

# PISTAS

## Educativas

Nueva Época • No. 120 • Octubre 2016 • ISSN 1405-1249

SEP  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA



# SENIE 2016

## XII SEMANA NACIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

  
Universidad Politécnica  
de Chiapas  
Tecnología para el bien común

UNIVERSIDAD  
AUTÓNOMA  
METROPOLITANA  
Casa abierta al tiempo   
Azcapotzalco

## TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**Manuel Quintero Quintero**  
Director

**DIRECTORIO ITC**  
**MED. Ignacio López Valdovinos**  
Director

**DR. José Antonio Vázquez López**  
Subdirector Académico

**M.F. Martín Campos Moreno**  
Subdirector de Servicios Administrativos

**MC. Julián Ferrer Guerra**  
Subdirector de Planeación y Vinculación

**MDPH Teresita de las Nieves Armengol Rico**  
Jefe del Departamento de Desarrollo Académico



## PISTAS EDUCATIVAS

[pistaseducativas@itcelaya.edu.mx](mailto:pistaseducativas@itcelaya.edu.mx)

### COMITÉ EDITORIAL

Héctor Rojas Garduño  
Miguel Magos Rivera  
José Antonio Lara Chávez  
Miguel Ángel Figueroa Sánchez  
Zabdiel Eliud Gutiérrez Flores  
Marco Antonio Viguera Cabrera  
Juan José Martínez Nolasco

*Pistas Educativas* es una publicación electrónica del Departamento de Desarrollo Académico del Instituto Tecnológico de Celaya. *Pistas Educativas* está disponible en dirección <http://pistaseducativas.itc.mx>. Los artículos y ensayos son responsabilidad de sus autores y no expresan necesariamente la ideología de la institución ni de la revista. En caso de citar la información de los contenidos se agradecerá dar los créditos a los autores, sus obras, así como a esta fuente.

Dirección: Antonio García Cubas Pte. No. 600 Esq. Av. Tecnológico, C.P. 38010, Celaya, Gto. Tel. 01-(461)-61-175-75. Fax. 01-(461)-61-179-79. Certificado de Licitud y Contenido 6216 y 4777, respectivamente. Registro de Derecho de Autor, Expediente de Reserva: 6 98 62. ISSN 1405-1249.

## PISTAS EDUCATIVAS No. 120, noviembre 2016

### Contenido

EDITORIAL .....	1
SIMULACIÓN E INTERACCIÓN GRÁFICA CON ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL PARA EL SENSADO Y MANIPULACIÓN DE OBJETOS <i>Morales González Gustavo Adolfo, González Palacios Max Antonio, Aguilera Cortés Luz Antonio</i> .....	2-20
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE MÁQUINA AUTOMATIZADA, PARA MEZCLADO DE POLIESTIRENO RECICLADO Y ARCILLA <i>Cruz Guzmán Gustavo, Chagolla Gaona Hernando, Rangel Miranda Domingo, Barrera Navarro Agustín, Silva Peñaloza Román, Hernández Padrón Genoveva</i> .....	21-36
AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA ESTUDIO DE TIEMPOS Y MOVIMIENTOS <i>Lara Chávez José Antonio, Magos Rivera Miguel, López Ontiveros Miguel Ángel, Loyo Quijada Jesús, Rodríguez Alvarado Lisaura Walkiria</i> .....	37-53
MODELO DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO USANDO EXPANSIÓN PARCIAL EN SERIES DE POTENCIA Y EL MÉTODO DE FORMAS NORMALES <i>Martínez Carrillo Irma, Juárez Toledo Carlos</i> .....	54-66
IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE CONTROL EN SISTEMAS ALTAMENTE NO-LINEALES <i>Gómez Martínez Miguel Angel, Pizano Martínez Alejandro, Zamora Cárdenas Enrique Arnoldo, Lozano García José Merced, Rostro González Horacio</i> .....	67-76
TABLERO DIDÁCTICO PARA PRÁCTICAS CON CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES <i>Magos Rivera Miguel, Lara Chávez José Antonio, Gutiérrez Flores Zabdiel Eliud, Ramírez Zúñiga Ruth Mireya, Farfán Espinoza David Alberto, Figueroa Sánchez Miguel Ángel</i> .....	77-93
SINCRONIZADOR DE OSCILADORES CAÓTICOS POR ACOPLAMIENTO A MODELOS EN REDES DE TOPOLOGÍA ESTRELLA <i>López Mancilla Didier, López Cahuich Gerardo</i> .....	94-111
LA TECNOLOGÍA MEMS COMO AUXILIAR EN EL POSICIONAMIENTO GPS A BAJO COSTO <i>Dávila Araiza Luis Francisco, González Ramírez Efrén, De La Rosa Vargas José Ismael, Villa Hernández José de Jesús</i> .....	112-127
DISEÑO DE UNA SIMULACIÓN PARA CONOCER EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA CELULAR OFDMA <i>Guerrero Méndez Olivia, Castañeda Camacho Josefina, Cortez Lilliana</i> .....	128-143
ANTENA FRACTAL DE SIERPINSKI PARA OPERAR EN LAS BANDAS DE 900 MHZ Y 1.8 GHZ <i>González Rangel Iván Rosendo, Serrano Chávez José, Vargas Sánchez Javier, Hernández Valdez Genaro, Andrade González Edgar Alejandro, Reyes Ayala Mario</i> .....	144-158



<b>SISTEMA DE COMUNICACIÓN UNIDIRECCIONAL POR MEDIO DE LUZ VISIBLE</b> <i>Ceja Pachinski Manfredo Manuelievich, Hernández Valdez Genaro</i> .....	159-177
<b>ESTIMACIÓN DE LA SEÑAL DE TV EN BANDA VHF</b> <i>Montoya Flores José María, Calvillo Téllez Andrés, Núñez Pérez José Cruz</i> .....	178-187
<b>AJUSTE NUMÉRICO DE LA RESPUESTA ESCALÓN DE UN CIRCUITO SERIE USANDO T</b> <i>Juárez Toledo Carlos, Martínez Carrillo Irma</i> .....	188-201
<b>CARACTERIZACIÓN DE LÁSERS DE BAJA POTENCIA PARA UN SISTEMA DE GRABADO</b> <i>Espinoza Maldonado Fabián, Jiménez Pérez Abimael, Muñoz Gómez José Antonio, Farías Mancilla José Rurik, Saucedo Carbajal Ángel</i> .....	202-219
<b>DISEÑO DIGITAL DE UN CONTROL DE POSICIÓN PARA UN MOTOR EN VHDL Y LABVIEW USANDO FPGA</b> <i>Hernández García Samuel, Sifuentes Mijares Juan, Paistel Sánchez Jean Philippe Andre</i> .....	220-233
<b>CERTIFICACIÓN EN DB2 DE LAS COMPETENCIAS EN BASE DE DATOS DE LOS ESTUDIANTES DE LA LICENCIATURA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS</b> <i>Álvarez Oval Luis Antonio, Castillo Estrada Christian Mauricio, De La Cruz Vázquez Aron</i> .....	234-251
<b>ANÁLISIS CUALITATIVO PARA LA DETECCIÓN DE FACTORES QUE AFECTAN EL RRENDIMIENTO ESCOLAR: ESTUDIO DE CASO DE LA LICENCIATURA EN TECNOLOGÍAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN</b> <i>Abascal Mena Rocío, López Ornelas Erick de Jesús, Zepeda Hernández Sergio</i> .....	252-267
<b>PROPUESTA DE DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN MÓVIL INTERACTIVA PARA APOYAR EL APRENDIZAJE EN LA EDUCACIÓN BÁSICA: HISTORIA DE MÉXICO, UNA NECESIDAD</b> <i>García Lucas Paula, Gómez Pérez Víctor Alberto, Benítez Hernández Arturo, Cruz Ahuactzi Jesús</i> .....	268-284
<b>DISEÑO DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE DIGITAL INTERACTIVO PARA FOMENTAR LA EMPATÍA EN ESTUDIANTES DE PRIMARIA</b> <i>Hernández Castelán María del Carmen, Ortega Ramírez Karen, Portilla Tirado Paulo, López Ornelas Erick de Jesús, González De Cossío Rosenzweig María, Victoriano Serrano Felipe</i> .....	285-299
<b>COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LA ENSEÑANZA DE LA PROGRAMACIÓN</b> <i>Zabaleta Carrillo Patricia, Pérez Cruz Damarís, Cocón Juárez J. Felipe, Morales Turrubiates E. Elvira</i> .	300-316
<b>ENSEÑANZA DE LA TEORÍA DE CONTROL UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE POR PROYECTOS</b> <i>Jiménez Cruz Joel Ricardo</i> .....	317-333
<b>DESARROLLO DE UN SIMULADOR DIDÁCTICO DE REDES DE PETRI DE BAJO NIVEL</b> <i>Bautista Hernández Fernando, Herrera Aguilar Ignacio, Sandoval González Oscar Osvaldo, Águila Rodríguez Gerardo, Rodríguez Jarquin José Pastor</i> .....	334-347
<b>DESARROLLO DE MESAS INTERACTIVAS MULTITOQUE BASADAS EN LA TECNOLOGÍA CAPACITIVA</b> <i>Ramírez Ortega Jesús, Hernández Vega Jorge de Jesús</i> .....	348-366
<b>PLAN-EA: GESTIÓN VÍA WEB DE PLANEACIONES ACADÉMICAS CONSIDERANDO ESTRATÉGIAS DOCENTES, RECURSOS EDUCATIVOS Y ESTILOS DE APRENDIZAJE</b> <i>Nicolás Mata Aurelio, Medina Ramírez Reyna Carolina, Casco Sánchez Fausto</i> .....	367-384
<b>PROPUESTA DE PROGRAMA EDUCATIVO EN LINEA: UNA EXPERIENCIA ACADÉMICA DE LA LICENCIATURA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN</b> <i>Aguilar Parra Javier, Suárez Villavicencio Jaime, Aispuro Félix Elvia Esthela</i> .....	385-401
<b>IMPORTANCIA DEL CÁLCULO EN EL DESARROLLO ACADÉMICO DEL INGENIERO</b> <i>Ruiz Ledesma Elena Fabiola, Carmona García Enrique Alfonso, Montiel Sánchez Ángel Salvador</i> .....	402-420
<b>PORTAL WEB COMO MEDIO DE CONSULTA DE SOFTWARE DE APLICACIÓN PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES EDUCATIVOS EN EL PROGRAMA DE LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN PARA LA EDUCACIÓN DE LA UAEH</b> <i>Martínez Lazcano Verónica, Montaña Montiel Mariel, Alonso Lavernia María de los Ángeles</i> .....	421-440
<b>ESTUDIO DE ACEPTABILIDAD DEL SITIO WEB REPOTOPICS BAJO EL ESQUEMA DEL MODELO DE ACEPTACIÓN DE TECNOLOGÍA DE DAVIDS</b> <i>De los Reyes Quiroz Fernando, Torres Frausto David Antonio, Villegas Téllez Rodrigo</i> .....	441-458
<b>RECURSO DIDÁCTICO PARA APRENDER CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN REDES SOCIALES</b> <i>Flores Oropeza Luis Alejandro, Román Loera Alejandro, López Delgadillo Edgar</i> .....	459-468

<b>MÓDULO DIDÁCTICO DE TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE OBJETOS</b> <i>Magos Rivera Miguel, Godínez Bravo Ricardo, Viguera Cabrera M. Antonio, Lara Chávez J. Antonio...</i>	<b>469-484</b>
<b>MÉTODO PRÁCTICO PARA DISEÑO DE INDUCTORES CON NÚCLEO DE AIRE</b> <i>Reider Burstín Jerry Nathan</i>	<b>485-500</b>
<b>DISEÑO DE UN INVERSOR RESONANTE SERIE PUENTE COMPLETO PARA UNA SONOBOYA ACTIVA</b> <i>Villalobos Mendoza Ricardo, Alvarado Juárez Miguel, Reyes Velázquez José, Vázquez Nava Nimrod</i>	<b>501-515</b>
<b>DISEÑO DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA INTELIGENTE CON SISTEMA FOTOVOLTAICO Y CELDA DE COMBUSTIBLE</b> <i>Rubio Cámara Erika Haydeé, Ordoñez López Luis Carlos, Ricalde Castellanos Luis Josué, De La Cruz May Emmanuel, Peón Escalante Ricardo Javier</i>	<b>516-532</b>
<b>SIMULACIÓN “HARDWARE IN THE LOOP” DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES DE IMÁN PERMANENTE</b> <i>Quirino Morales Félix, Mino Aguilar Gerardo, Graniel García Beatriz Eugenia, Peralta Sánchez Edgar, Guerrero Castellanos José Fermi</i>	<b>533-551</b>
<b>MEDICIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE</b> <i>De La Cruz May Emmanuel, Ordoñez López Eduardo Ernesto, Ricalde Castellanos Luis Josué, Cruz Jiménez Braulio José</i>	<b>552-566</b>
<b>ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CON FINES DE INVESTIGACIÓN</b> <i>Quiroz Vázquez Fernando Isidoro, González Rivera Juan Alejandro, Coronado Vázquez Juan Carlos, Cárdenas Galindo Víctor Manuel, Rivera Rivera Ana Cecilia</i>	<b>567-580</b>
<b>EVALUACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA CONTROL DE VELOCIDAD DE MÁQUINAS DE CD DE IMANES PERMANENTES</b> <i>Jiménez González José, González Montañez Felipe de Jesús, Beltrán Carbajal Francisco, López García Irvin, Campero Littlewood Eduardo, Hernández Ávila José Luis</i>	<b>581-597</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA DIAGNOSTICAR FALLAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES</b> <i>Canseco García Hiram Alberto, López García Irvin, Olivares Galván Juan Carlos, Jiménez González José, González Montañez Felipe de Jesús, Escarela Pérez Rafael</i>	<b>598-615</b>
<b>CONTROLADOR DIGITAL DE UN RECTIFICADOR PWM MONOFÁSICO, IMPLEMENTADO EN UN DISPOSITIVO PROGRAMABLE DE BAJO COSTO</b> <i>Ortega Alejos Julio, Estrada Rojo Leonel, Fuentes Hernández Carlos A., Rodríguez Segura Elías J. J.</i>	<b>616-633</b>
<b>ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR CUK PARA ILUMINACIÓN LED</b> <i>Juárez León Francisco Alejandro, Rodríguez Segura Elías José Juan</i>	<b>634-650</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA ESCALAR SPWM EN UN SISTEMA DE BAJO COSTO</b> <i>Juárez León F. Alejandro, Pérez Pinal F. Javier, Capilla Castillo L. Adrián, Rodríguez Estrada Heriberto</i>	<b>651-664</b>
<b>DISEÑO DE UN ACELERÓMETRO PARA MONITOREO SÍSMICO</b> <i>Santalucía Ríos Jorge Rodolfo, Montero Flores Leonardo Gastón</i>	<b>665-679</b>
<b>SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MEDIDA REMOTA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS DE AGUA USANDO UN SENSOR PIEZOELÉCTRICO</b> <i>Vega Luna José Ignacio, Lagos Acosta Mario Alberto, Salgado Guzmán Gerardo, Tapia Vargas Víctor Noé, Sánchez Rangel Francisco Javier</i>	<b>680-697</b>
<b>DISEÑO DEL TABLERO AUTOMOTRIZ REMOTO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EXPERIMENTAL VE-LINCE 1</b> <i>Ramírez Arredondo Luis Antonio, Pérez Pinal Francisco Javier</i>	<b>698-713</b>
<b>ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA TELEMEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL ALMACENAMIENTO DE GRANOS</b> <i>Cázarez Ayala Gerardo, Rodríguez Beltrán Antonio, Castillo Meza Hugo, Lugo Zavala Sócrates, Ramírez Montenegro Miguel Enrique, Fonseca Beltrán Jaime, Martínez López David</i>	<b>714-735</b>
<b>MEDIDOR DE PH, ELECTRO-CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS</b> <i>Barrales Guadarrama Raymundo, Reyes Ayala Nicolás, Rodríguez Rodríguez Ezequiel Melitón, Barrales Guadarrama Víctor Rogelio, Vázquez Cerón Ernesto Rodrigo, Medina Blancas Alan Jorge</i>	<b>736-758</b>



<b>MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN UNA FUENTE DE FOTOTERAPIA</b> <i>Luján Ramírez Carlos Alberto, Flores Solís Eric Iván, Atoche Enseñat José Ramón, Álvarez Cervera Margarita, Moreno Sabido Mario Renán.....</i>	<b>759-769</b>
<b>SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE BAJO COSTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EMPLEANDO RASPBERRY PI</b> <i>May Tzuc Oscar, González Quijano Juliana, Ortiz López José Daniel, Quijano Cetina Renán.....</i>	<b>770-788</b>
<b>ENCODER MAGNÉTICO PARA MEDICIONES ANGULARES DE ALTA PRECISIÓN</b> <i>Ojeda Moreno Miguel Antonio, Zúñiga Eduardo.....</i>	<b>789-800</b>
<b>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y BASE DE TIEMPO PARA FUTURA Sonda ESTRATOSFÉRICA EN MISIÓN ESPACIAL DE ÓRBITA BAJA</b> <i>Silva García Miguel Ángel, Espinosa Calderón Alejandro, Padilla Medina José Alfredo, Mendoza Bárcenas Mario Alberto, Santiago Cruz Lauro, Prieto Meléndez Rafael.....</i>	<b>801-817</b>
<b>SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA LAGUNA DEL CARPINTERO</b> <i>Larí Menchaca Julio, Ibarra Martínez Salvador, Castan Rocha José Antonio, Castan Rocha Emilio.....</i>	<b>818-831</b>
<b>DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONTROL DE HUMEDAD DE PLANTAS</b> <i>Manjarez Carrillo Ander Osvaldo, Banda Chávez Juan Manuel, Damián Padilla Laura Yaremith, Rodríguez Vidal Luz María, Peraza Arjona Omar Francisco, Serrano Rubio Juan Pablo, Herrera Guzmán Rafael.....</i>	<b>832-847</b>
<b>EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE UNA PIEZA MAQUINADA EN UNA ETAPA COMO SUSTITUTO DE UN COMPONENTE ENSAMBLADO PARA UN AVIÓN COMERCIAL UTILIZANDO MEF Y EXTENSOMETRÍA</b> <i>Mendoza Muñoz Ismael, Nuño Moreno Víctor, Moreno Ahedo Luis Omar, Velázquez Victórica Karla Isabel, López Guerrero Aida, Olivares Fong Luz Del Consuelo.....</i>	<b>848-861</b>
<b>DISEÑO DE UN SISTEMA PORTÁTIL PARA MEDICIÓN DE BIOIMPEDANCIA</b> <i>Juárez León Francisco Alejandro, Ramírez Agundis Agustín, Vela Aguirre Noé de Jesús.....</i>	<b>862-875</b>
<b>SÍNTESIS ELECTRÓNICA DE UNA CÉLULA <math>\beta</math> EMPLEANDO OPAMS</b> <i>Fernández Carreón Viridiana, Muñoz Pacheco Jesús Manuel, Félix Beltrán Olga Guadalupe, Zambrano Serrano Ernesto.....</i>	<b>876-893</b>
<b>MONITOREO INTERACTIVO CON CONTROL DE CONSUMO ELÉCTRICO CON FINES DE USO EFICIENTE Y AHORRO ENERGÉTICO</b> <i>Herrera Galicia Rubén, Camacho Cruz Elíasin, Hernández López Fernando Alexis, Pérez Zamora Adriana Del Carmen, Gómez Ruiz Ernesto.....</i>	<b>894-910</b>
<b>PROTOTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CON EQUIPAMIENTO SOLAR DE BAJO COSTO</b> <i>Gutiérrez Calderón José Sebastián, Rodrigo Cruz Pedro Manuel.....</i>	<b>911-922</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DRON DE BAJO COSTO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL CLIMA</b> <i>Santoyo Luévano Israel, Cázares Vieyra Javier Isaac, Avilés Cruz Carlos, Villegas Cortez Juan, Zúñiga López Arturo.....</i>	<b>923-938</b>
<b>SISTEMA MECÁNICO-ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DINÁMICOS EN FORMACIONES FERROVIARIAS</b> <i>Antonio Ojeda Miguel Antonio, Mario Amé Ricardo.....</i>	<b>939-957</b>
<b>HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ENSEÑANZA DE LA ROBÓTICA</b> <i>Cruz Jiménez Braulio José, Contreras Rivero Jannette, Peón Escalante Ricardo Javier, Ricalde Castellanos Luis Josué.....</i>	<b>958-972</b>
<b>MANIPULACIÓN DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO A DISTANCIA</b> <i>Gudiño Lau Jorge, Ríos Cortes Felipe De Jesús, Durán Fonseca M. Ángel, Charre Ibarra Saida Miriam.....</i>	<b>973-987</b>
<b>CONTROL EN LAZO ABIERTO DE UN SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA MEDIANTE UN INVERSOR Y UNA TARJETA ARDUINO</b> <i>Canseco García Hiram Alberto, González Montañez Felipe, Jiménez González José, Torres Carmona Ricardo Guadalupe, Hernández Ávila José Luis, Campero Littlewood Eduardo.....</i>	<b>988-1002</b>
<b>DESARROLLO, MODELADO Y CONTROL DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE POSICIÓN ANGULAR</b> <i>Pablo Hernández Mark Billy, Alcántara Ramírez Roberto A., Jaimes Ponce Jorge Miguel, Siller Alcalá Irma Irasema.....</i>	<b>1003-1019</b>

<b>DISEÑO DE PROTOTIPO PARA MEJORAR LA DICCIÓN MEDIANTE EL USO DE MODELOS OCULTOS DE MARKOV</b> <i>Pedroza Ramírez Ángel David, De la Rosa Vargas José Ismael, García Domínguez Ernesto, Gamboa Rosales Hamurabi, Becerra Sánchez Aldonso.....</i>	<b>1020-1038</b>
<b>ESCUCHANDO A LA NATURALEZA: DEL RECONOCIMIENTO DE VOZ A LA BIOACÚSTICA</b> <i>Pedroza Ramírez Ángel David, De la Rosa Vargas José Ismael, Rosas Valdez Rogelio.....</i>	<b>1039-1056</b>
<b>MEDICIÓN DE ESTRÉS A PARTIR DE LA FRECUENCIA CARDIACA Y LA RESPUESTA GALVÁNICA DE LA PIEL</b> <i>González Rivera Mario Alaín, Jiménez Cruz Joel Ricardo.....</i>	<b>1057-1074</b>
<b>SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE DÍGITOS MANUSCRITOS UTILIZANDO REDES NEURONALES</b> <i>Martínez Cabrera Juan Manuel, Becerra Sánchez Aldonso, Zepeda Valles Gustavo, Esparza Guerrero Santiago, García Correa Uriel Ramírez.....</i>	<b>1075-1093</b>
<b>SIDESIM-O GHERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE MODULADORES <math>\Sigma\Delta</math> BASADA EN "OCTAVE"</b> <i>Bouzars Munguía X. Victoria, Alducin Castillo Javier, Ocampo Hidalgo J. Jesús, Vázquez Álvarez Iván.....</i>	<b>1094-1110</b>
<b>DISEÑO DE UN FILTRO DIGITAL PASA BAJAS DE PRIMMER Y SEGUNDO ORDEN A PARTIR DE CIRCUITO RC</b> <i>Chipule Pérez Armando Satiel, Águila Rodríguez Gerardo, Posada Gómez Rubén.....</i>	<b>1111-1125</b>
<b>DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA SELECCIÓN DE GRANOS DE CAFÉ TOSTADO BASADO EN UN MICROPROCESADOR RASPBERRY-PI</b> <i>Bautista Bautista Alberto Nicolás, Vivanco Trujillo Víctor, García Martínez Mario Alberto, Sandoval González Oscar Osvaldo.....</i>	<b>1126-1138</b>
<b>ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE ROEDOR USANDOPROCASAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES</b> <i>Santa Bárbara Cebada Jorge Manuel, Barreto Flores Aldrin, Martínez García María Isabel.....</i>	<b>1139-1152</b>
<b>DISEÑO DE UN ALGORITMO DE SEGMENTACIÓN DE OBJETOS Y CARRETERAS, ENFOCADO A SISTEMAS DE ASISTENCIA VEHICULAR</b> <i>Burgos Bonilla Juan Luis, Morales Rosales Luis Alberto, Algreto Badillo Ignacio.....</i>	<b>1153-1171</b>
<b>SÚPER RESOLUCIÓN Y MEJORA DEL ALGORITMO CANNY PARA LA DETECCIÓN DE BORDES EN IMÁGENES MÉDICAS</b> <i>Pérez Gutiérrez Jaime Sacramento, Magadán Salazar Andrea, Pinto Elías Raúl, Mejía Lavalle Manuel.....</i>	<b>1172-1186</b>
<b>DESIGN AND IMPLEMENTATION ON A FPGA OF A FACIAL RECOGNITION SYSTEM USING "EIGEN FACES"</b> <i>Barrios Del Villar Sergio, Raygoza Panduro Juan José, Salamanca Chavarín Alejandra, Becerra Álvarez Edwin Christian, Ortega Cisneros Susana.....</i>	<b>1187-1200</b>
<b>BLOQUES DE ADAPTACIÓN ANALÓGICOS BASADOS EN LMS DE SIGNO</b> <i>López Delgadillo Edgar, Flores Oropeza Luis Alejandro, Díaz Méndez Alejandro.....</i>	<b>1201-1211</b>
<b>USER-CENTERED DESIGN IN MOODLE REDESIGN FOR MOBILE USE</b> <i>González Beltrán Beatriz Adriana, Gallardo López María Lizbeth, Reyes Ortiz Alejandro, Granados García Araceli.....</i>	<b>1212-1224</b>
<b>AGRUPAMIENTO DE SERVICIOS WEB MEDIANTE EL ALGORITMO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS</b> <i>Bravo Contreras Maricela Claudia, Mora Gutiérrez Román Anselmo, Flores Sánchez Iván, Alcántara Ramírez Roberto Alfonso.....</i>	<b>1225-1241</b>
<b>SISTEMAS DE DETECCIÓN DE PUNTOS DE ACCESO WIFI EN UN CENTRO DE DATOS</b> <i>Vega Luna José Ignacio, Lagos Acosta Mario Alberto, Salgado Guzmán Gerardo, Tapia Vargas Víctor Noé, Sánchez Rangel Francisco Javier.....</i>	<b>1242-1260</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EMBEBIDO EN UN FPGA</b> <i>Delgado Vázquez J. Carlos, García Martínez M. Alberto, Posada Gómez Rubén, Herrera Aguilar Ignacio.....</i>	<b>1261-1276</b>
<b>SISTEMA SUPERVISORIO DE UNA MICRORRED CD BASADO EN COMUNICACIÓN CAN</b> <i>Tovar Zavala Ernesto Everardo, Díaz Carmona Javier, Rodríguez Segura Elías, Ramírez Agundis Agustín, Espinosa Calderón Alejandro.....</i>	<b>1277-1295</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN EN FPGA DE SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA UNA PLATAFORMA DE MONITOREO AMBIENTAL</b> <i>Regalado Sánchez Julio César, Espinosa Calderón Alejandro, Padilla Medina José Alfredo, Díaz Carmona José Javier.....</i>	<b>1296-1313</b>



<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EQUIPO DE PERFORACIÓN BASADO EN EL MICROCONTROLADOR PIC16F877A</b> <i>Rabanales Márquez Eddy, Ramírez Betancour Reymundo, Ramírez Hernández Julio César, Martínez Solís Fermín.....</i>	<b>1314-1328</b>
<b>REGISTRO DE RUTA SEGUIDA POR AUTOBUSES USANDO GPS Y ZIGBEE</b> <i>Vega Luna José Ignacio, Lagos Acosta Mario Alberto, Salgado Guzmán Gerardo, Tapia Vargas Víctor Noé, Sánchez Rangel Francisco Javier.....</i>	<b>1329-1347</b>
<b>CARGADOR DE APLICACIONES PARA EL MICROCONTROLADOR ATMEGA328P BUSCANDO APROVECHAR LOS RECURSOS DE UNA TARJETA ARDUINO</b> <i>Santiago Espinosa Felipe, Martínez Cruz Zenón Belarmino.....</i>	<b>1348-1366</b>
<b>SISTEMA DE REGISTRO DE DATOS VÍA RFID Y CÓDIGO DE BARRAS</b> <i>Magos Rivera Miguel, Godínez Bravo Ricardo, Rodríguez Islas Ivonne Karina.....</i>	<b>1367-1384</b>
<b>IDENTIFICACIÓN DIGITAL E INFRAESTRUCTURA PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD EN EL CIBERESPACIO</b> <i>Cortes Martínez Francisco Roger, Herrera Candelaria Ángel Daniel, Martínez Peláez Rafael, Saavedra Benítez Yesica Imelda, Velarde Alvarado Pablo.....</i>	<b>1385-1399</b>
<b>ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y GENERACIÓN DE NOTIFICACIONES EN GNU/LINUX MEDIANTE AGENTES PARA UN SISTEMA DE GESTIÓN DIGITAL</b> <i>Silva López Rafaela Blanca, Matías Hernández Viridiana, Montes de Oca Solís Israel Isaac, Pablo Leyva Hugo.....</i>	<b>1400-1417</b>
<b>MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DEL PEZ BLANCO</b> <i>Viguera Velázquez Midory Esmeralda, Carbajal Hernández José Juan, Sánchez Fernández Luis Pastor, Hernández Martínez Margarita.....</i>	<b>1418-1434</b>
<b>BASIC APPLICATION OF EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR CIRCUIT DESIGNING</b> <i>Martínez González Ricardo Francisco, Méndez Gamboa Marcos Alonso, Palomeque Loyo José Luis Fernando.....</i>	<b>1435-1445</b>
<b>SIMULACIÓN DE FUEGOS ARTIFICIALES UTILIZANDO PYTHON</b> <i>Alanís Urquieta José David, Vázquez Valencia Joel, Bermúdez Juárez Blanca, Calderón González Marisol, Morales Hernández María Luisa.....</i>	<b>1446-1460</b>
<b>TECNOLOGÍA MÓVIL PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO RÁPIDO PARA GENERAR SISTEMAS DE INFORMACIÓN</b> <i>Vargas Pérez Laura Silvia, Soto Hernández Ana María, Peralta Escobar Jorge, Gutiérrez Tornés Agustín Francisco, Felipe Riverón Edgardo Manuel, Uc Ríos Carlos Eduardo, Vargas Pérez Vanessa Atenea.....</i>	<b>1461-1478</b>
<b>ANIMACIÓN DE UN MODELO 3D DEL ROBOT DARWIN-OP UTILIZANDO KINECT</b> <i>Benítez Ruiz Antonio, Medina Nieto Ma. Auxilio, Medina Nieto Miguel Ángel, De la Calleja Mora Jorge.....</i>	<b>1479-1495</b>
<b>ANÁLISIS DEL PERFIL DE PERSONALIDAD UTILIZANDO EL TEST NEO-FFI Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES</b> <i>Jaén Rendón María de la Paz, Morales Rosales Luis Alberto, Maceda Gómez Graciela, Algreto Badillo Ignacio, Lobato Báez Mariana.....</i>	<b>1496-1509</b>
<b>PROTOCOLO DE AUTENTICACIÓN MUTUA ENTRE VEHÍCULO Y UNIDAD EN CARRETERA BASADO EN EL ALGORITMO DIFFIE-HELLMAN PARA UNA RED VANET</b> <i>Betancourt Saucedo Julio César, Martínez Peláez Rafael, Velarde Alvarado Pablo, Ruíz Joel, Saavedra Benítez Yesica Imelda.....</i>	<b>1510-1525</b>
<b>ALGORITMO DE CIFRADO SIMÉTRICO BASADO EN MAPEO LOGÍSTICO Y TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER</b> <i>Elizalde Canales Francisca Angélica, Rivas Cambero Jesús Iván.....</i>	<b>1526-1543</b>
<b>CATEGORIZACIÓN DE RESÚMENES DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS BASADA EN SIMILITUD SEMÁNTICA</b> <i>Reyes Ortiz José Alejandro, Bravo Contreras Maricela Claudia.....</i>	<b>1544-1560</b>
<b>HACIA APLICACIONES COLABORATIVAS ADAPTABLES AL BLENDED-LEARNING</b> <i>Ávila Galván Dora Angélica, Mezura Godoy María del Carmen, Sánchez Morales Gabriela.....</i>	<b>1561-1579</b>
<b>SERVIDOR HTTP SEGURO EN UN SISTEMA EMBEBIDO</b> <i>Alvarado Nava Oscar, Rodríguez Martínez Eduardo, Chablé Martínez Hilda María.....</i>	<b>1580-1598</b>

## EDITORIAL

En su edición 120 la revista *Pistas Educativas* publica con agrado la Memoria de la Décimo Segunda Semana Nacional de Ingeniería Electrónica –SENIE 2016-, que se llevó a efecto entre el 5 y el 7 de octubre bajo la organización conjunta de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, así como la Universidad Politécnica de Chiapas, fungiendo esta última institución como anfitriona del evento. Cada uno de los artículos que aquí se publican fueron sometidos a la consideración de un grupo evaluador constituido por dos investigadores expertos en el tema y es del Comité Técnico de SENIE 2016 la responsabilidad en lo que se refiere a su calidad técnica. Por su parte, *Pistas Educativas* tuvo bajo su cuidado la edición de los textos de acuerdo, como siempre, con sus normas de publicación. A través de esta edición, el Instituto Tecnológico de Celaya, por medio de *Pistas Educativas*, avanza en su cometido de ser un vehículo para la difusión del conocimiento, albergando en esta ocasión las experiencias y logros de los que dan cuenta en sus artículos los estudiantes, profesores e investigadores de buena parte del sistema educativo nacional que se congregaron en SENIE 2016.



# **SIMULACIÓN E INTERACCIÓN GRÁFICA CON ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL PARA EL SENSADO Y MANIPULACIÓN DE OBJETOS**

***Gustavo Adolfo Morales González***

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca  
*ga.moralesgonzalez@ugtomx.onmicrosoft.com*

***Max Antonio González Palacios***

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca  
*maxg@ugto.mx*

***Luz Antonio Aguilera Cortés***

Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca  
*aguilera@ugto.mx*

## **Resumen**

En el presente trabajo se lleva a cabo el desarrollo de una aplicación que involucra diversas áreas del conocimiento como lo son la robótica, la automatización y la programación con la finalidad de crear un sistema mecatrónico que permita la discretización de un conjunto de objetos con la ayuda de un manipulador, un módulo de sensado y una plataforma de desarrollo industrial. La principal característica de dicha plataforma es la versatilidad para modelar diversos tipos de robots y, sobre todo, permitir la interacción del usuario con el sistema que ha diseñado, esto implica el hecho de realizar una simulación del mismo antes de ser accionado o, incluso, hacer el seguimiento de cada uno de los movimientos que realiza un robot de manera real.

**Palabra(s) Clave(s):** Automatización, interacción gráfica, robótica.

## **1. Introducción**

En la actualidad se ha vuelto cada vez más evidente la necesidad del diseño, instrumentación e implementación de sistemas que permitan satisfacer una creciente demanda en la producción de prácticamente cualquier sector industrial. En respuesta a estas necesidades es completamente necesario pensar en la inclusión de dispositivos que puedan realizar tareas que por diversas limitaciones resultan demasiado complicadas para el ser humano, estas herramientas son por excelencia los robots.

Un robot se define, de manera formal en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), como un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, a través de movimientos variables programados, para el desempeño de tareas diversas [1]. Existen en estos momentos robots que pueden desempeñar un gran número de tareas con una enorme precisión y si a esto se le añade un proceso de sensado apropiado para la aplicación deseada así como un control computarizado estamos en presencia de un sistema con un enorme potencial, que puede ir desde una operación de paletizado o de discretización de objetos hasta la creación de otras máquinas.

En el presente trabajo se propone una aplicación que incluye tres componentes comúnmente utilizados en un sistema automatizado: el uso de un manipulador que permita la discretización de un conjunto de objetos colocados dentro de su espacio de trabajo, el proceso de sensado de una determinada característica de los objetos (su color en este caso) y a su vez la creación de una aplicación en una plataforma de interacción gráfica, la cual permite llevar un monitoreo del proceso, ver figura 1.

En [17] se plantea un simulador de manipuladores que posee una interesante base de datos y que tiene la capacidad de importar varios prototipos de estas máquinas, sin embargo no presentan una interfaz completa como en el caso del actual proyecto donde se puede tener una interacción humano-máquina.

Es importante mencionar que en un trabajo como el realizado en [18] se sientan las bases del actual proyecto, al abordar de lleno el estudio de la cinemática de



manipuladores seriales de diversos grados de libertad, en este caso para uno de seis revolutas.

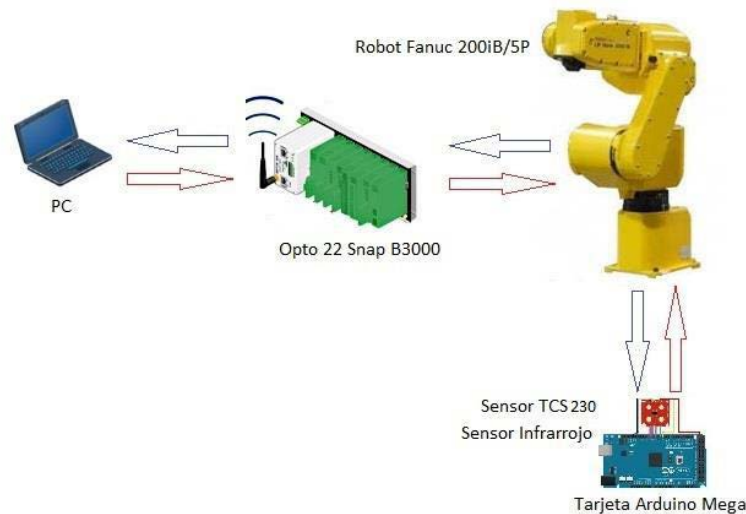


Figura 1 Diagrama de la aplicación propuesta.

La aplicación consiste en lo siguiente: frente al robot se encuentra un tablero matricial de 3x3 espacios, de los cuales su centro respecto al plano XY está separado 50 mm tanto en X como en Y respecto a los huecos circundantes, dentro de estos espacios son colocados 9 cubos que tienen por arista 45 mm, el manipulador recorre el tablero de izquierda a derecha, de arriba hacia abajo. Al costado izquierdo del manipulador se dispone de un módulo de sensado, donde el manipulador identifica el color del cubo y se dispone a llevarlo a uno de los 3 contenedores que se encuentran al lado derecho del mismo. Como primer punto debe implementarse todo lo anterior de manera física, usando el control del manipulador para grabar un programa que se encargue de realizar los movimientos necesarios para el transporte de los objetos, en segundo lugar se debe crear un proceso gráfico e interactivo usando la plataforma ADEFID [2], en el cual se genere una escena idéntica a la real, y se tenga la posibilidad de observar una simulación del proceso, previa a cualquier acción por parte del robot. En esta parte es de reconocer el trabajo llevado a cabo en [19] donde se expone la elaboración de un entorno visual del tipo CAD para una plataforma de simulación, elaborado en buena parte usando otro de los recursos del presente proyecto [15],

sin embargo se utiliza una técnica distinta para la importación de archivos muy eficiente en el presente proyecto para la adquisición del robot. Además, también tener el poder de controlar el manipulador Fanuc de manera remota, es decir, mediante un diálogo, ejecutar determinadas acciones que modifiquen la tarea que se está realizando de manera física. Finalmente, realizar un monitoreo del proceso a distancia mediante una interfaz de comunicación que incluye Wi Fi, por lo cual no es necesario estar cerca del área de trabajo, la figura 2 ilustra lo anterior.

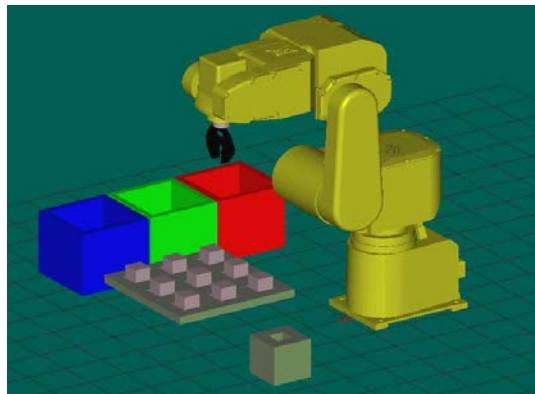


Figura 2 Escena del proceso.

La justificación de la creación de esta aplicación es demostrar la utilidad de un sistema automatizado, en el cual se requiere la aplicación de conocimientos de diversas áreas de ingeniería, donde la seguridad del personal que interactúa con el equipo se convierte en una prioridad ya que el uso de manipuladores reduce los riesgos de manera considerable. Actualmente pueden verse aplicaciones industriales reales que utilizan una metodología muy similar, algunos ejemplos son:

- Identificación y separación de diversos tipos de medicamentos basados en una etiqueta o en el color del medicamento en sí [3].
- Discretización de piezas u objetos variados (vasos de colores y utensilios de cocina, bolas de billar, piezas de robot y de armado Lego) [4].
- Manipulación de probetas u otros recipientes similares donde el contenido corrosivo o a una alta temperatura no permite la manipulación humana [5, 6].

- Separación de piezas identificadas por etiquetas en espacios confinados o expuestos a fuentes constantes de contaminación por ruido o cercanas a fuentes de una alta temperatura (hornos) [7].

## 2. Desarrollo

En esta sección se habla a detalle de la aplicación propuesta en la introducción de este trabajo, se describen cada uno de los módulos y la metodología seguida para enlazarlos hasta llegar a formar un sistema automatizado.

### Robot Fanuc LR MATE 200iB 5P

El Fanuc LR MATE 200iB 5P, mostrado en la figura 3, es un robot industrial de seis grados de libertad eléctricamente servo-accionado [1]. Se trata de un robot de alta precisión que además es muy versátil dado su tamaño y tipo de montaje, estas características lo convierten en un candidato idóneo al estar en presencia de espacios estrechos o donde se dispone de poca superficie para llevar a cabo una automatización más compleja.

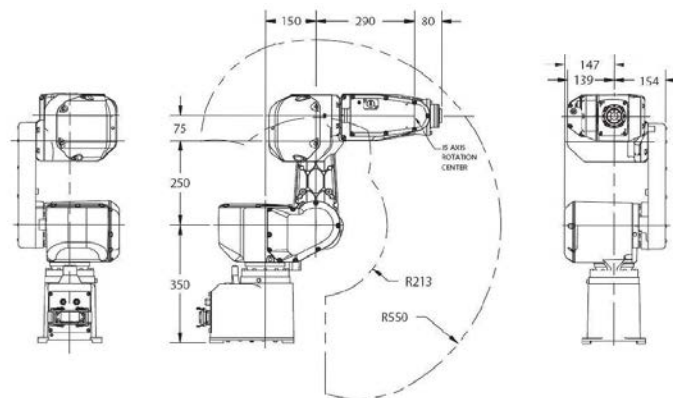


Figura 3 Esquema del robot Fanuc 200iB 5P. [8]

El LR MATE 200iB 5P es ideal para una variedad de aplicaciones de manipulación de materiales, incluyendo operaciones de sujeción, apilamiento, ensamblaje, etc. También tiene la versatilidad para llevar a cabo el lavado de partes o piezas, la remoción de material, entre otras.

En los siguientes puntos se exponen partes cruciales de la presente aplicación, la primera de ellas es el dispositivo de control de dicho manipulador, posteriormente se explican las formas en que éste puede ser manejado, haciendo énfasis en la necesidad de realizar un proceso de manera automatizada.

### **Controlador RJ3iB**

El controlador RJ3iB [8], es un dispositivo integrado por una serie de módulos que se encargan de llevar a cabo todas las funciones relacionadas con el manipulador, las cuales van desde la programación del mismo hasta la toma de datos y comunicación con dispositivos externos.

### **Puerto CRM79**

El puerto CRM79 [9], es una interfaz que posee 50 pines en total, el cual tiene un funcionamiento interno que puede ser configurable utilizando un común a 0 V o a 24 V, según la configuración de los pines SDICOM1 y SDICOM2, tiene 20 entradas y 20 salidas digitales, el resto son pines a 0 V y a 24 V. Este puerto es parte fundamental de la comunicación realizada entre el controlador y los dispositivos externos.

### **Control del Robot (Robot en modo manual y modo automático)**

En este apartado se trata un tema fundamental en la aplicación desarrollada. El control de manera remota de diversas funciones del manipulador es una excelente herramienta para la automatización de un proceso.

El robot cuenta con una manera de programación que resulta muy accesible para el usuario, se trata de una programación realizada con base a grabar las posiciones deseadas por las cuales se pretende que el robot realice su recorrido, los tipos de trayectorias disponibles se analizan más a fondo en el siguiente apartado.

El método de programación del robot posee las siguientes características:

- Creación de Programas. El iniciar un nuevo programa resulta sencillo mediante el control manual. Se debe elegir un nombre para el mismo, de

manera tal que pueda ser distinguido posteriormente y lo más importante, ser elegido de manera remota.

- Grabado de Puntos. El usuario posiciona de manera arbitraria el manipulador en una serie de posiciones por las cuales se ha de desplazar.
- Uso de Registros. Similar a los lenguajes de programación donde es posible apoyarse de variables para desarrollar un determinado algoritmo, en este tipo de programación existen registros que permiten tener un control más preciso del comportamiento del robot, un ejemplo claro es el almacenar en un registro el número de ocasiones que ha sido activado alguno de los pines de uno de los puertos del controlador.
- Recursos Variados de Programación. Al ir creando un programa es necesario contar con una serie de instrucciones con las cuales se va rigiendo el desarrollo del mismo, para mencionar algunos de éstos se cuenta con temporizadores, etiquetas, condicionales, etc. Este tipo de elementos son ya bien conocidos en las formas de programación serial más utilizadas como Lenguaje C, por lo cual también son indispensables en esta metodología de escritura de código.

## **Adquisición y Procesamiento de Datos**

### **Descripción del Módulo de Sensado**

El módulo consiste en la creación de una base que permita colocar el sensor de tal manera que no sufra alteraciones en cuanto a posición ni a iluminación al momento de realizar su función, además permite tener cerca la tarjeta de adquisición de datos y fijarla de igual manera para evitar desconexiones o fallos por movimiento de los elementos.

El sensor TCS230, mostrado en la figura 4, es un convertidor programable de luz a frecuencia, el cual combina fotodiodos de silicón configurables y un convertidor de corriente a frecuencia en un circuito integrado de tecnología CMOS [10].

El convertidor de luz a frecuencia lee un arreglo de fotodiodos de 8x8, cada arreglo puede filtrar luz roja, verde, azul o blanca desde la fuente de la misma a través de dos pines de control (S2, S3) y arrojar como salida una onda

cuadrada(al 50% del ciclo de trabajo) con frecuencia directamente proporcional a la intensidad de luz (irradiancia). La frecuencia de salida puede ser escalada mediante dos pines de entrada de control (S0, S1).

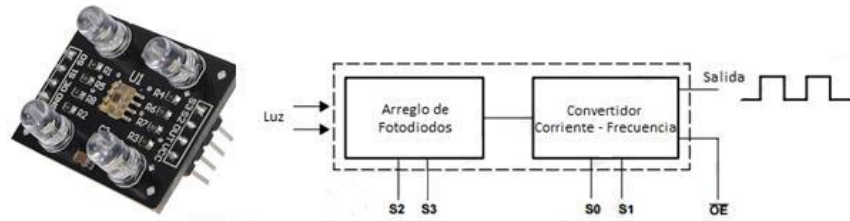


Figura 4 Sensor TCS230.

Las entradas y salidas digitales permiten una interfaz directa con un microcontrolador u otro circuito lógico digital.

### **Control y adquisición de datos mediante una tarjeta Arduino Mega 2560**

Es evidente que se requiere de un dispositivo que brinde flexibilidad y la capacidad de obtener los datos provenientes del sensor, realizar el procesamiento necesario y entregar un conjunto de señales digitales que sean fácilmente interpretadas por el controlador del manipulador mediante el uso del puerto CRM79, el cual ya fue explicado a detalle anteriormente.

Arduino es una plataforma electrónica de fuente abierta basada en la practicidad en cuanto al uso de hardware y software. En este caso en particular se recurrió al uso de una tarjeta Arduino Mega 2560 [11], la cual es un módulo microcontrolador basado en el ATmega2560.

La programación de la tarjeta para la aplicación realizada se ilustra en figura5.

### **Dispositivo de Comunicación Opto 22 (PC-Manipulador, Manipulador-PC)**

Una vez que se ha desarrollado prácticamente toda la parte física de la aplicación propuesta es necesario pensar en un dispositivo que permita la transmisión de datos entre la PC y el robot.

Un brain Opto 22 SNAP B3000 ENET, figura 6, es una unidad de control que puede ser utilizada de manera aislada o como parte de un sistema de control distribuido, esto es posible debido a los diversos módulos con los cuales puede



ser combinado, destacan los módulos digitales, análogos y los de propósitos especiales [12].

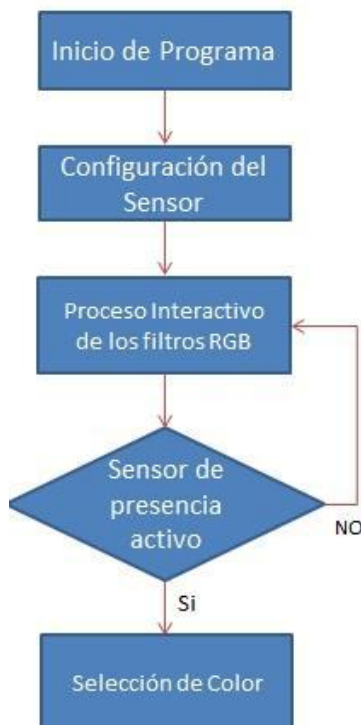


Figura 5 Lógica de programación para detección de color.



Figura 6 Opto 22 SNAP B3000 Ethernet Brain.

Este dispositivo entre diversas ventajas, ofrece un intercambio de datos vía Ethernet, un sistema SNAP Ethernet puede ser incorporado a una red existente, haciendo muy sencillo el monitoreo y el control de un determinado proceso donde sea necesario.

## Uso de la Plataforma ADEFID

ADEFID (Advanced Engineering Platform for Industrial Development) [2], se trata básicamente de un kit de desarrollo de software escrito en MS Visual Studio C++ con la ayuda de las bibliotecas de OpenGL. ADEFID [2] está dedicada a la solución de aplicaciones industriales con retroalimentación interactiva y gráfica, figura 7.

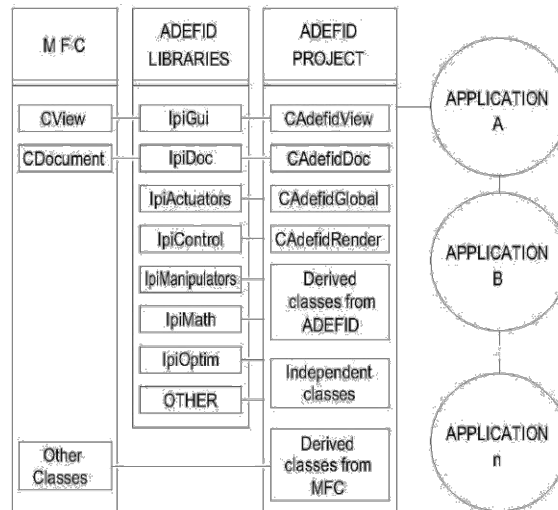


Figura 7 Diagrama que muestra las partes principales de ADEFID. [2]

## Estudio de la Cinemática del Robot

Para el cálculo cinemático se realiza la obtención de los parámetros Denavit-Hartenberg [13], los cuales son el primer paso para el cálculo de la cinemática directa y la cinemática inversa [14].

En esta convención, cada matriz de transformación es representada como un producto de cuatro transformaciones básicas, ecuación 1 [13].

$$A_i = Rot_{z,\theta_i} Tras_{z,d_i} Tras_{x,a_i} Rot_{x,\alpha_i} \quad (1)$$

Para la aplicación de la ecuación anterior es necesario proponer un conjunto de sistemas de referencia para cada una de las articulaciones del manipulador, figura 8.

Una vez realizado el análisis cinemático utilizando la metodología Denavit-Hartenberg para cada articulación se muestran los parámetros D-H en la tabla 1.

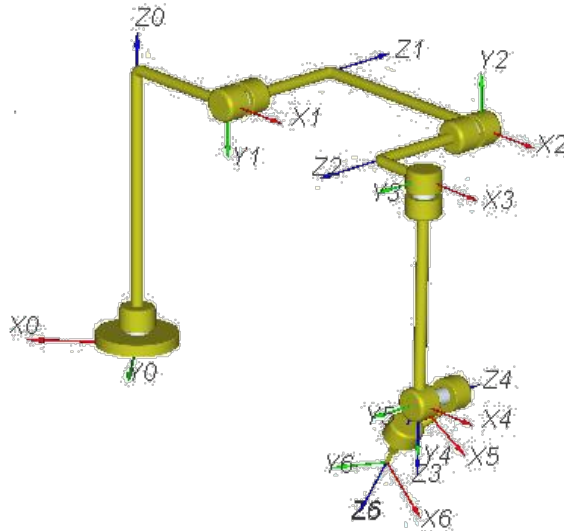


Figura 8 Sistema de coordenadas propuesto.

Donde:

$\theta_i$  es la variable correspondiente al ángulo de articulación.

$a_i$  es conocida como la longitud del eslabón.

$d_i$  se refiere al offset del eslabón.

$\alpha_i$  hace referencia al ángulo de giro de cada una de las uniones.

Tabla 1 Tabla de parámetros D-H.

Eslabón	$\theta_i$	$a_i$	$d_i$	$\alpha_i$
1	$\theta_1$	150	350	$-\frac{\pi}{2}$
2	$\theta_2$	250	154	$\pi$
3	$\theta_3$	75	154	$\frac{\pi}{2}$
4	$\theta_4$	0	209	$\frac{\pi}{2}$
5	$\theta_5$	0	0	$-\frac{\pi}{2}$
6	$\theta_6$	0	105	0

### Descripción de la Tarea Programada en ADEFID

Dentro de ADEFID [2], trabajan de manera conjunta un grupo de clases que fungen ejecutando tareas específicas cada una de ellas [15], a continuación se

enlistan algunas de las principales y que más influencia tienen en el desarrollo de la aplicación que es objeto este trabajo:

- CADEFIDDoc. Se trata de la clase principal, en ella se llevan procesos como la inicialización de las máquinas presentes dentro de una determinada aplicación, se configura una gran variedad de parámetros y se ejecuta la función *MaterialHandlingProcess()*, la cual se mantiene ejecutando de manera continua los algoritmos de las máquinas creadas.
- CADEFIDView. Se encarga de manipular el entorno gráfico de la plataforma.
- CADEFIDRender. Se caracteriza por generar la escena estática y dinámica de la aplicación en ejecución.
- RConveyor. Se hace una mención especial a esta clase dado que cumple un papel sumamente importante al hacer uso de productos (objetos, piezas) que interactúan con el manipulador. En este caso es de suma utilidad al momento de la generación de los cubos, pero sobretodo, en el instante en que estos objetos son arrojados hacia los contenedores; es la que permite crear esa emulación de caída dentro de estos.
- CManipulator. Clase que resulta fundamental al realizar aplicaciones con robots. En ella se encuentran las funciones descritas acerca del cálculo de la cinemática directa y la cinemática inversa. Contiene un algoritmo especializado para la implementación de tareas con manipuladores y brinda la posibilidad de generar clases derivadas, donde es posible enfocarse en un robot en específico, en este caso, es donde se realiza la clase para el Fanuc.

Es en este punto donde se genera la clase CMFanuc200iB, como se muestra en el esquema inferior, figura 9, en ella se realiza la configuración de parámetros para la creación del robot Fanuc, y se genera el algoritmo necesario para la ejecución de la tarea propuesta.

ADEFID [2] tiene la capacidad de generar el esqueleto de un determinado manipulador simplemente con programar de manera correcta los parámetros D-H, sin embargo, se plantea la necesidad de dar más realismo al proceso, por lo cual se requiere procesar el CAD del robot Fanuc, Fig. 10, utilizando un software de

diseño, en este caso Autodesk Inventor [16], de tal manera que pueda ser ingresado a la plataforma, esto gracias a que se cuenta con la posibilidad de realizar lectura de archivos del tipo STL.

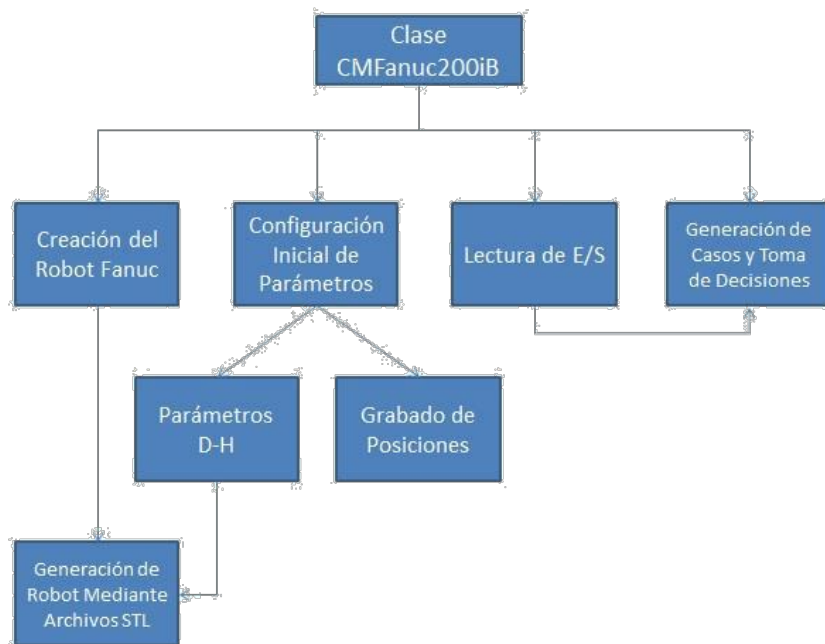


Figura 9 Tareas desarrolladas por la clase CMFanuc200iB.

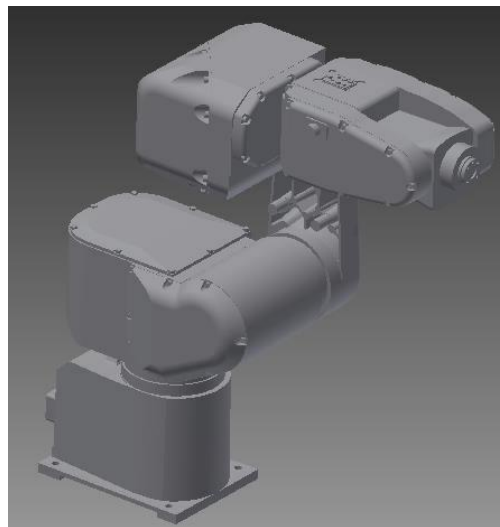


Figura 10 Archivo CAD del Fanuc 200iB 5P.

Una vez realizado lo anterior se tiene la posibilidad de observar el robot de manera completa o solamente su esqueleto, figura 11.



Figura 11 Esqueleto y robot completo creado en ADEFID [2].

### 3. Resultados y Discusión

#### Desarrollo Gráfico de la Tarea

Los elementos creados en ADEFID [2] permiten dar un panorama general del objetivo a realizar aún sin siquiera ver la parte física, esta es una de las principales ventajas de contar con un software de interacción gráfica.

Con base a la programación desarrollada es posible observar un proceso que imita de manera muy cercana al que está desarrollando el robot, se tiene una serie de herramientas que permiten modificar la escena. Con el uso de este recurso es posible detectar detalles que podrían provocar fallos en la aplicación real, y sobre todo, se genera un proceso interactivo donde el usuario puede observar el proceso sin estar dentro del espacio del manipulador o teniendo que sostener el control manual para realizar movimientos de la máquina.

#### Cuadro de Diálogo

Para cumplir la condición de controlar el robot de manera externa resulta fundamental la creación de un cuadro de diálogo, mostrado en la figura 12, una vez realizado, éste cumple con una serie de funciones:

- La primera sección del diálogo se utiliza para configurar el modo de lectura del puerto CRM79, este puede colocarse de tal manera que sus pines se activen con un 0 o un 1 lógico.



- En segundo lugar se tiene el método de ingreso del programa que se desea ejecutar, el método PNS (Program Selection Number), aquí es importante considerar que el PNS4 representa el bit de mayor prioridad.
- En la tercera sección se encuentra la parte de control, una serie de botones que resultan sumamente útiles respecto a la toma de decisiones por parte del manipulador. En primer lugar se tiene *Start Motion*, botón responsable de dar inicio a la tarea una vez que la parte física se encuentra preparada. A un costado se ha colocado un botón de paro de emergencia, elemento fundamental en caso de alguna falla o percance. Los botones de *Reset* y *Restart Motion* son utilizados en caso de que exista algún problema y el robot haya sido detenido, el primero limpia las variables del sistema y el segundo se encarga de reiniciar la tarea. *Demo* es el encargado de iniciar con una simulación del proceso, para esto fue programada la tarea de tal manera que es capaz de generar valores aleatorios y desplegar colores cuando los cubos pasan por el sensor virtual, esta herramienta de simulación resulta sumamente útil para detectar posibles fallos del sistema como lo son las singularidades, además funge como un elemento que brinda una perspectiva de cómo se desarrolló el proceso. Finalmente *Show Results* da la información final acerca de cuantas piezas de cada color fueron encontradas.

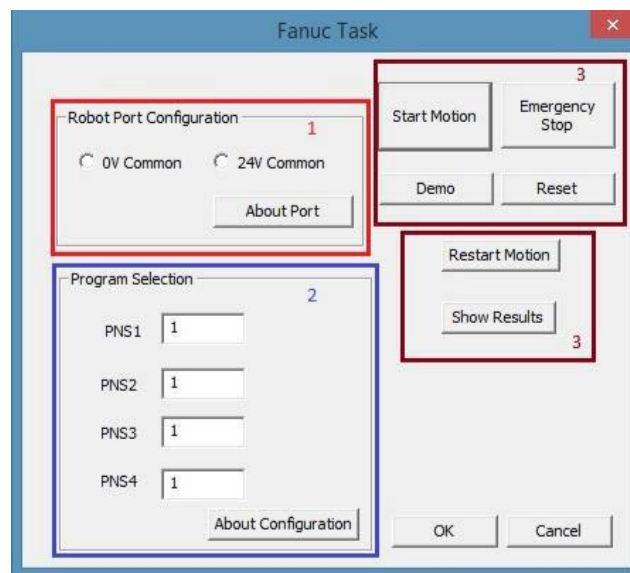


Figura 12. Cuadro de dialogo.

## Comparativa Entre el Proceso Real y el Proceso Virtual

La principal aportación de este trabajo es poder realizar el monitoreo del proceso desde la PC, para esto es necesario ajustar lo más posible la parte gráfica a la tarea real. La figura 13 muestra algunas imágenes comparativas tomadas de forma simultánea de la computadora y del proceso real para la detección del color rojo.

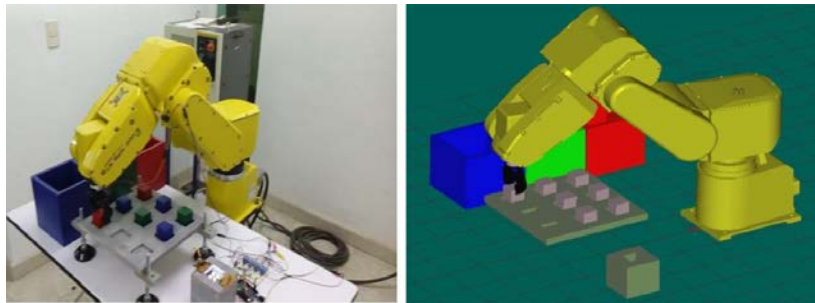


Figura 13. Primer movimiento por una nueva pieza.

Una vez que el robot ha tomado la pieza se ubica en algunas posiciones intermedias con la finalidad de evitar golpear otros objetos presentes en el espacio de trabajo, en la figura 14, el manipulador posiciona la pieza en cuestión justo arriba del sensor, en este punto se realiza la medición ya que el sensor de presencia ha detectado el cubo.

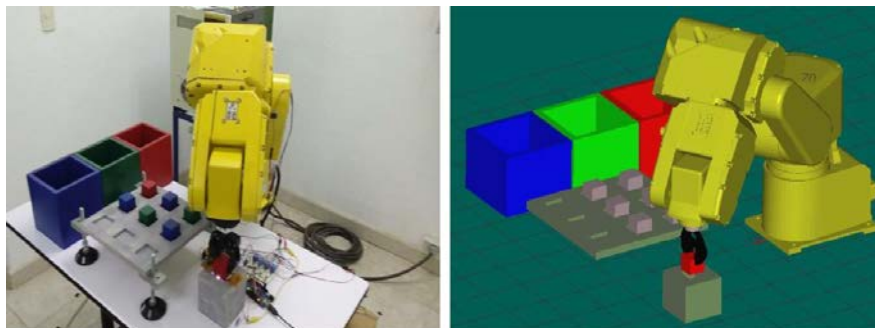


Figura 14 Posición Lectura: Sensores entran en funcionamiento y se realiza lectura color.

Finalmente el Fanuc se posiciona encima del contenedor seleccionado, como se muestra en la figura 15, recibe una señal de apertura de la pinza y ejecuta un pequeño retardo para asegurarse que la pieza se deposita sin problemas dentro del recipiente.

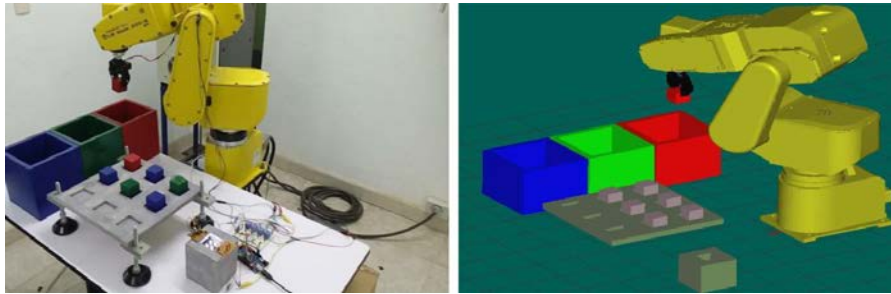


Figura 15 Posición Entrega: Se deposita la pieza actual.

## 5. Conclusiones

Debido a su robustez y a la posibilidad de añadir diversos módulos dependiendo del propósito que se le quiera dar, además del hecho de poder transmitir datos vía protocolo Ethernet, la aplicación de controladores como el Opto 22 SNAP B3000 ENET permitió desarrollar una interfaz de comunicación robusta y confiable entre el controlador del robot y la plataforma ADEFID.

Una plataforma de desarrollo tan completa como ADEFID [2] brinda al usuario la posibilidad de desarrollar una infinidad de aplicaciones dado que está basada en un lenguaje de programación conocido por ser muy potente (C++). La gran cantidad de librerías de las cuales se dispone, además de las desarrolladas por el programador permiten la creación de proyectos en los cuales el usuario puede involucrarse de manera directa haciendo uso de diálogos. Esto resulta fundamental, ya que el efectuar una programación muy compleja sin poder implementar un control con la misma sería limitar mucho el potencial del software. El involucrar el estudio de la robótica con la programación realizada refuerza los conocimientos en ambas áreas, por una parte es fundamental tener las bases teóricas que permitan entender la cinemática de un manipulador, en este caso un robot serial de 6 grados de libertad, como también poder trasladar esos conocimientos a un ambiente gráfico donde se pueda llevar a cabo el desarrollo de todo un proceso sin siquiera disponer del equipo en forma física. Gracias a ello se pudo lograr el monitoreo deseado así como la simulación de todo el sistema.

Hablando sobre trabajo a futuro, un sistema con el propuesto tiene una gran cantidad de posibles áreas de oportunidad tanto generales como en cada uno de sus módulos. La primera de ellas sería la implementación de un sistema móvil que

lleve objetos una y otra vez al espacio de trabajo del robot, con esto se lograría un sistema completamente automatizado y con mucho potencial. La segunda de ellas es el uso de un sistema de censado más potente, donde los objetos pudiesen ser manipulados de acuerdo a características como su forma, orientación, posición, etc., generando un sistema totalmente versátil que pudiese adaptarse a un gran número de tareas. Finalmente, una aplicación sumamente interesante y que conlleva a la investigación y planteamiento de un problema físico más complejo es la manipulación de objetos haciendo uso de robots cooperativos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] S. K. Saha, *Introducción a la Robótica*. 2010. McGraw Hill Companies. Pp. 5-8.
- [2] M.A. Gonzalez-Palacios, "Advanced Engineering Platform for Industrial Development", *The Journal of Applied Research and Technology*. Vol. 3. No. 10. 2014. Pp. 309-26.
- [3] M-1iA Picking Robot Sorts Pills By Color. [https://youtu.be/mThmeC\\_K6Vo](https://youtu.be/mThmeC_K6Vo). Agosto de 2015.
- [4] Clean Room Robot Bin Picks Plastic Caps At High Speeds - FANUC America. <https://youtu.be/8x819ufrzlo>. Agosto de 2015.
- [5] LR Mate 200iB Test Tube Loading Robot. [https://youtu.be/NliWk\\_zpBW0](https://youtu.be/NliWk_zpBW0). Agosto de 2015.
- [6] FANUC LR Mate 200iC/5L Robot Laboratory Data Collection. <https://youtu.be/QpHMTt24LOE>. Agosto de 2015.
- [7] Automated Electronic Connector Assembly System with FANUC Robot – Durabotics. [https://youtu.be/29hzeR\\_czio](https://youtu.be/29hzeR_czio). Agosto de 2015.
- [8] I. FANUC Robotics RJ3iB Mate Controller LR Handling Tool Operator's Manual. FANUC Robotics America. USA. 2005.
- [9] I. FANUC Robotics RJ3iB Mate Controller Maintenance Manual. FANUC Robotics America. USA. 2005.
- [10] TCS230 Programmable Color Light-to-Frequency Converter. <http://www.unihedron.com/projects/darksky/tcs230-e33.pdf>. Mayo 2015.

- [11] Arduino Language Reference. <https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>. Octubre 2015.
- [12] Opto 22 SNAP Ethernet Brains.[http://www.opto22.com/documents/1083\\_SNAP\\_Ethernet\\_Brain\\_data\\_sheet.pdf](http://www.opto22.com/documents/1083_SNAP_Ethernet_Brain_data_sheet.pdf). Noviembre 2015.
- [13] M. W. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, Robot Modeling and Control. 2006. Wiley. Pp. 76-78.
- [14] J. J. Craig, Robótica. Tercera Edición. 2006. Prentice-Hall. Pp. 62-128.
- [15] I. Horton, Beginning Visual C++ 2008. 2008. Wrox Press. Indianapolis.
- [16] Autodesk Inventor 2015 Learn & Explore. <https://knowledge.autodesk.com/support/inventor-products/learn-explore/#?sort=score>. Agosto 2015.
- [17] Z. Longjiang, L. Renjun, Ng. Kam Pheng, N. Aditya, H. Zhiyong, "A Robotics Simulator Platform for RADOE". The 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics. 2016. Pp. 44-48.
- [18] M. A. González-Palacios, E. A. González-Barbosa, L. A. Aguilera Cortés, SnAM: A Simulation Software on Serial Manipulators, Engineering with Computers, Springer. 2012. Pp.1-8. DOI: 10.1007/s00366-011-0246-6.
- [19] J. Norberto Pires, P. Neto, A. P. Moreira, "Robot Path Simulation: a Low Cost Solution Based on CAD". IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. 2010. Pp. 333-338.

## **7. Autores**

Gustavo Adolfo Morales González egresado de la licenciatura en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad de Guanajuato y actual estudiante de la Maestría en Ingeniería Eléctrica en la misma institución.

Dr. Max Antonio González-Palacios recibió el grado de Ph.D. en Automatización y Robótica por la "McGill University" Montreal, Quebec, en diciembre de 1992.

Dr. Luz Antonio Aguilera Cortés recibió el grado de doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato, 1995.

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE PROTOTIPO DE MÁQUINA AUTOMATIZADA, PARA MEZCLADO DE POLIESTIRENO RECICLADO Y ARCILLA

## ***Gustavo Cruz Guzmán***

Instituto Tecnológico de Querétaro  
*tavo\_best@hotmail.com*

## ***Hernando Chagolla Gaona***

Instituto Tecnológico de Querétaro  
*hchagollag@hotmail.com*

## ***Agustín Barrera Navarro***

Instituto Tecnológico de Querétaro  
*abn792001@yahoo.com.mx*

## ***Román Silva Peñaloza***

Instituto Tecnológico de Querétaro  
*rom\_sp210@hotmail.com*

## ***Domingo Rangel Miranda***

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM  
*ranged@fata.unam.mx*

## ***Genoveva Hernández Padrón***

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada UNAM  
*genoveva@fata.unam.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la automatización de una máquina mezcladora de poliestireno reciclado y arcilla con el propósito de mantener bajo control de calidad los parámetros dimensionales de las muestras, fabricadas en forma de tabletas de 1" de diámetro y 3 mm de espesor. Dichos parámetros dimensionales son imprescindibles para llevar a cabo una caracterización dieléctrica y mecánicas de



materiales con propiedades de aislamiento eléctrico y soporte mecánico. Esta máquina consta de un sistema para dosificar el poliestireno remolido y la arcilla tratada tipo Dickita. Un sistema de calentamiento e inyección que limita la cantidad de muestra que es introducida en un molde de metal y donde se deposita el material mezclado. El control del proceso se logra a través del autómatas Siemens S7-1200 AC/DC/RLY y una HMI Siemens KTP-400. Con ello se obtiene un sistema capaz de mantener las variables del proceso bajo control. Se presentan como resultados de este trabajo, las características de los bloques funcionales de la máquina, así como las primeras muestras obtenidas y datos de los parámetros dimensionales del material compuesto generado, los cuales inciden directamente sobre los parámetros dieléctricos a partir de este proceso de fabricación automatizado.

**Palabra(s) Clave(s):** Arcilla, automatización, control, dosificación, inyección.

## **1. Introducción**

Los materiales dieléctricos juegan un papel importante en el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos. Los materiales cerámicos son mejores dieléctricos que los materiales poliméricos, sin embargo presentan desventajas como alta fragilidad y elevadas temperaturas de proceso, lo que limita sus aplicaciones en dispositivos electrónicos modernos y mecatrónicos, los cuales deben de tener cierta flexibilidad mecánica o capacidad de amortiguamiento de vibraciones mecánicas; en cambio, la naturaleza viscoelástica de los polímeros se puede interpretar como un comportamiento intermedio entre un líquido viscoso puro y un sólido elástico ideal [1]. Los composites hechos a través de polímeros y arcilla están llamando la atención debido a que presentan diversas ventajas en comparación a composites poliméricos [2]. Se han hecho investigaciones donde se comprueban las ventajas de combinar estos dos materiales [3] como lo son mejoras térmicas y mecánicas entre otras.

Un material compuesto o composite es un sistema material integrado por una combinación de dos o más micro o macro estructuras que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre sí.

Para la realización de este composito se utiliza la técnica de moldeo por inyección. El proceso parece ser muy simple, pero existen diversas fuentes de variación (temperatura, presión, velocidad, tiempos, etc) las cuales lo hacen difícil de controlar causando una no linealidad afectando la calidad del producto terminado. Un componente plástico moldeado depende de los parámetros involucrados en el proceso que típicamente son establecidos por el operador según su criterio. Por lo tanto, surge la necesidad de contar con un sistema capaz de contrarrestar los cambios inherentes al sistema y así mantenerlo bajo control en todo momento para obtener piezas de gran calidad de manufactura para su posterior análisis y caracterización. Investigaciones realizadas para la optimización del moldeo por inyección, concluyen que existen cinco parámetros del proceso que son considerados críticos en la variabilidad de los atributos de calidad: temperatura del plástico, temperatura del molde, presión de empaque y tiempo de enfriamiento [4] y la homogeneidad de los materiales.

## **2. Desarrollo**

El proyecto fue desarrollado en el Laboratorio de Automatización y Sustentabilidad del Instituto Tecnológico de Querétaro. En el punto 2.1 se identifican las propiedades de los materiales involucrados en este trabajo, dado que es la base de la cual parten las consideraciones de diseño.

### **Propiedades de los materiales**

Las propiedades de los materiales son descritas en la tabla 1 [5,6]. Tomando en cuenta las propiedades de los materiales (tabla 1), se identificaron las partes que debe contener el prototipo de la máquina (figura 1).

### **Áreas de interés para el diseño de la máquina**

Para identificar las características de cada una de las partes de la máquina fue elaborado un análisis, mismo que se describe, en cada una de las secciones siguientes. En algunos casos, no es requerido un análisis muy riguroso o estricto, por lo cual no se aborda su desarrollo, tal el caso del tamaño de los contenedores

de material, que fue determinado, con base a mantener la fabricación de obleas constante sin necesidad de volver a alimentar, sin embargo, nuestra máquina a nivel prototipo, no afecta en medida significativa el tamaño de los contenedores, dado que la fabricación de obleas, no requiere la fabricación constante.

Tabla 1 Propiedades de los materiales.

Material	Poliestireno (PS)	Arcilla
Tipo	Cristal	Dickita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$
Temperatura de fundido	190-288 °C	1000-1550 °C
Temperatura de transición vítrea (tg)	100 °C	-----
Temperatura de fusión (tm)	235 °C	1100°C
Temperatura del molde	38-65 °C	-----
Presión	49 psi-99 psi	-----
Encogimiento	0.004-0.010 mm	-----



Figura 1 Áreas de interés para el diseño de la máquina.

## Dosificación

El área de dosificación está integrada por dos contenedores de forma cilíndrica que protegen al material con capacidad de almacenaje de 200 gramos cada uno. Para transportar el material hacia el cilindro de inyección se diseñó una válvula tipo tornillo sin fin (figura 2).

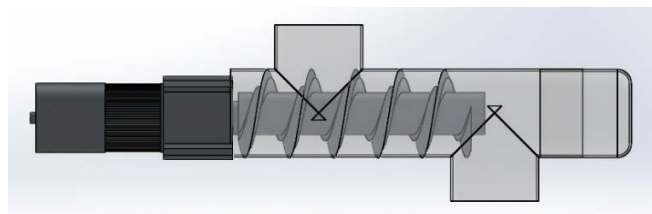


Figura 2 Válvula tornillo sin fin.

La capacidad de transporte está dada por ecuación 1.

$$S = \lambda * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (1)$$

Donde S es el área de relleno del transportador, en  $m^2$ ; d es el diámetro del canalón del transportador, en m; y  $\lambda$  es el coeficiente de relleno de la sección.

Sustituyendo:

$$S = 0.4 * \frac{\pi * 0.02^2}{4} = 0.000125 m^2.$$

La velocidad del desplazamiento del transportador (V), se calcula mediante ecuación 2.

$$V = \frac{P * \pi}{60} \quad (2)$$

Donde V es la velocidad, en m/s. P es el paso del tornillo, en m. N es la velocidad de giro del eje del tornillo en rpm.

Sustituyendo:

$$V = \frac{0.007 * 120}{60} = 0.014 \text{ m/s}$$

El flujo de material transportado (Q) se calcula mediante ecuación 3.

$$Q = 3600 * S * v * \rho * i \quad (3)$$

Donde Q es el flujo de material transportados, en t/h. S es el área de relleno del transportador, en  $m^2$ ,  $\rho$  es la densidad del material transportado, en  $t/m^3$ . I es el coeficiente de flujo del material debido a la inclinación del transporte.

Sustituyendo:

$$Q = 3600 * 0.000125 * 0.014 * 0.625 * 1 = 0.0039375 \text{ t/h}$$

## Potencia

La presión necesaria para la inyección de un polímero tipo Poliestireno (PS) es de 49-99 psi [4]; la cual es generada por un motor CA. Existe una relación entre la potencia del motor y la presión generada por el mismo para procesos de inyección de plástico [7], figura 3.

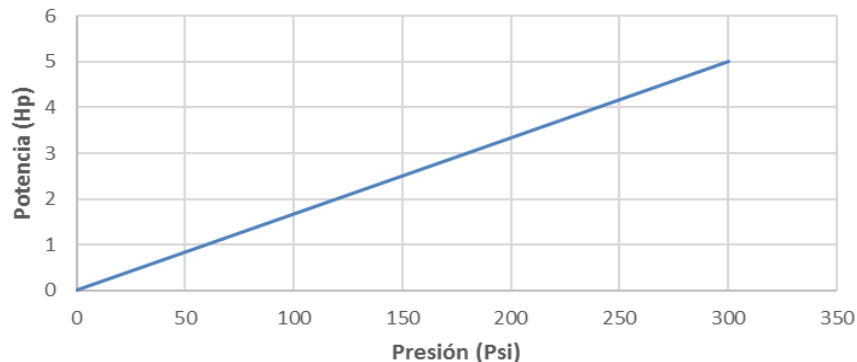


Figura 3 Gráfica presión vs potencia.

Para la selección del motor se tiene ecuación 4.

$$T = \frac{hp \cdot 716}{rpm} \quad (4)$$

Sustituyendo:

$$T = \frac{1hp \cdot 716}{54rpm} = 15.24 \text{ kg/m}$$

Para determinar la presión (P), tenemos ecuación 5.

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Sustituyendo:

$$P = \frac{15.24kg}{0.00038 m^2} = 40126.70 \text{ kg/m}^2 \approx 57 \text{ psi}$$

## Inyección

El barril se selecciona de acuerdo a la cantidad de material que se inyecta en cada tiro; las piezas moldeadas son de 1.5 gramos de material (figura 4). La capacidad teórica se define como el volumen máximo de material que puede ser desplazado por el pistón de inyección, la cual se determina con ecuación 6.

$$Ci = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot L \quad (6)$$

Donde Ci es la capacidad de inyección; d es el diámetro del tornillo en cm. L es el recorrido máximo del tornillo en cm.

$$Ci = \frac{\pi}{4} \cdot 2.5^2 \cdot 15 = 73.6 \text{ cm}^3$$

El rango de temperatura necesaria para el calentamiento e inyección de los materiales se encuentra entre 188-190 °C [8]. Por lo tanto se selecciona una

resistencia tipo banda de 5 cm de diámetro y 13 cm de largo con una potencia de 762 watts (figura 5).



Figura 4 Barril de inyección.

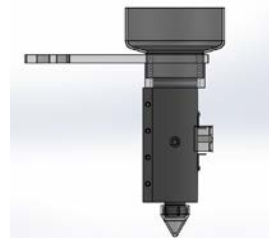


Figura 5 Resistencia calefactora.

Un mecanismo piñón-cremallera, acciona un vástago dentro del barril el cual inyecta el material en el molde (figura 6). El cual tiene las siguientes características:

- Distancia, ecuación 7.

$$d = \frac{z}{n} \quad (7)$$

- Velocidad de desplazamiento, ecuación 8.

$$v = N * \left( \frac{z}{n} \right) \quad (8)$$

Donde z es el número de dientes del piñón; n es el número de dientes por centímetro de la cremallera; N son las rpm.

Sustituyendo:

$$d = \frac{41}{1.5} = 27.3 \text{ cm}$$

$$v = 54 * \left( \frac{41}{1.5} \right) = 1474.2 \text{ cm/min}$$

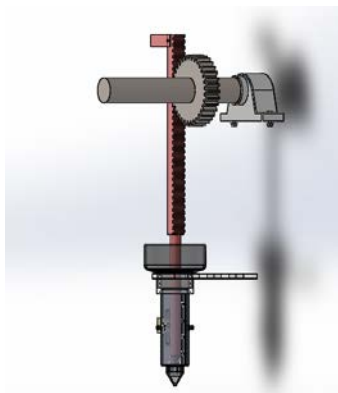


Figura 6 Mecanismo piñón-cremallera para la inyección.

## Control

El control de la máquina se realiza mediante el PLC Siemens S7-1200 CPU1214C AC/DC/Relay 6ES7 214-1BG31-0XB0. Algunas de sus principales características se muestran en tabla 2.

Tabla 2 Características PLC siemens S7-1200.

Característica	Descripción
I/O	14 DI 24V DC; 10 DO Relay 2A; 2AI 0-10V DC
Memoria de datos	75 kb
Interfaz	Profinet
Voltaje de suministro	120 V AC
Salida de corriente	1600 mA; max. 5 V DC para SM y CM

El diagrama de flujo del proceso (figura 7) se caracterizó por los tiempos de inyección, ecuación 9.

$$t_i = \frac{(sFm / FI)^2}{8(Tx - Tm / Tc - Tm)^2} \quad (9)$$

Donde S es el espesor de la pieza= 3 mm. FM es el recorrido máximo del fundido= 20mm. FI es la relación recorrido de flujo/espesor de pared= 100:1. Tc es la temperatura de fundido= 220 °C. Tm es la temperatura del molde= 20 °C, y Tx es la temperatura de distorsión bajo carga= 85 °C

Sustituyendo:

$$t_i = \frac{(3 \cdot 20 / 100)^2}{8(85 - 20 / 220 - 20)^2} = 0.8 \text{ s}$$

Saúl Sánchez Valdés en el libro Moldeo por Inyección de Termoplásticos [5] propone un tiempo de sostenimiento de 2 segundos.

## Operación

Para manejo y programación de los parámetros de la máquina, se utiliza un HMI KTP 400 modelo 6AV2 123-2DB03-AX0 (figura 8). Desde éste dispositivo el operador puede controlar las variables del proceso [9]. Sus principales características son:

- 24 V DC.
- Compatibilidad con Tia Portal.



- Puerto de comunicación Ethernet.
- Puerto usb.
- 320x240 pixeles.
- 75 Mhz.

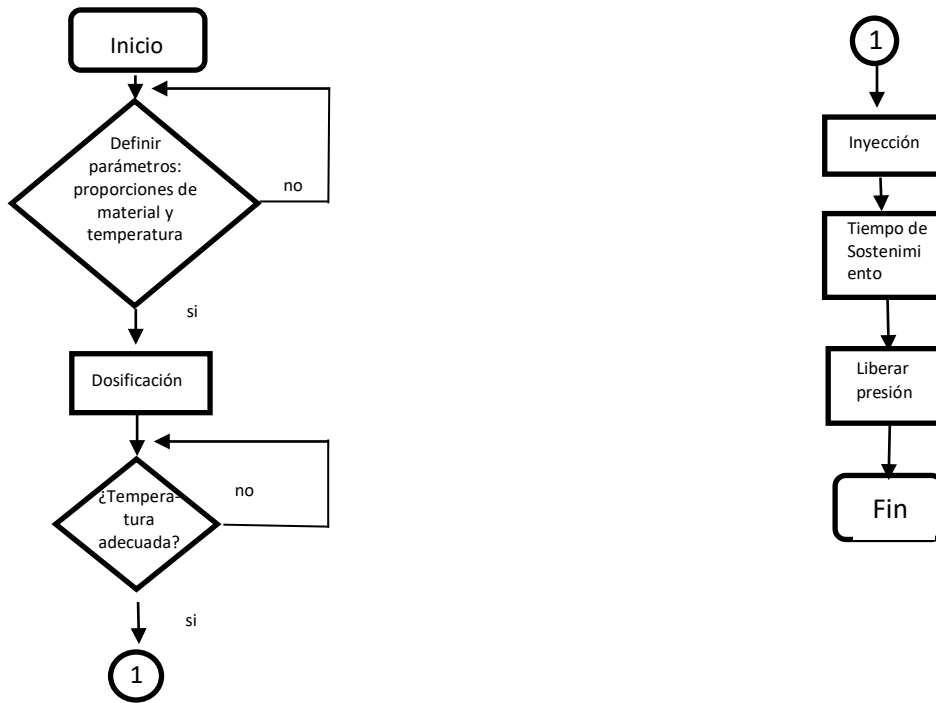


Figura7 Diagrama de flujo del proceso.



Figura 8 HMI Siemens KTP400.

### 3. Resultados

Dentro de los resultados obtenidos para la automatización de la máquina se muestran los diseños de los nuevos contenedores de arcilla y el poliestireno, están hechos de teflón para evitar contaminación de los materiales por oxidación, corrosión etc., así como para darle soporte mecánico y evitar deformaciones, las cuales incidirían en la precisión de la mezcla, como podemos apreciar en figura 9. Otro resultado obtenido es el sistema térmico para fundir el poliestireno reciclado, el cual se caracterizó térmicamente como un sistema de primer orden pues solo se toma en cuenta la capacidad térmica del contenedor y es por donde se extruye el material. Una vez alcanzada la temperatura de fusión, se aplica presión y se logra con ello inyectar material al contenedor que da forma a las muestras. Este sistema es controlado con un termostato colocado en una de las paredes del contenedor.



Figura 9 Contenedores para dosificar los materiales.

Es importante señalar que existe un gradiente de temperatura a lo largo del extrusor o inyector que es de aproximadamente 18 cm, y fue necesario tomar en cuenta la temperatura de control en la punta cónica donde sale el material, ya que esa es la temperatura que permitirá una inyección adecuada, como se aprecia en la figura 10.



Figura 10 Componentes de la unidad fusión térmica e inyección.

También se pudo llevar a cabo la inyección automatizada debido a que se tiene un sistema mecánico basado en piñón cremallera, el cual incrementa la precisión con la que es extruido el material al molde de metal. Este acoplamiento tiene pasos lineales del orden de milímetros que dan por resultado tener volúmenes de inyección del orden de mililitros. Tiene posicionados interruptores mecánicos de carrera para dar la secuencia exacta de llenado del molde, la cual es controlada desde el Controlador Lógico Programable, como se aprecia en la figura 11.



Figura 11 Mecanismo Cremallera-piñón para controlar la inyección.

Un elemento importante que pudo resolver la repetitividad en la fabricación de mezclas de poliestireno-arcilla fue la interfaz hombre máquina, ya que el tipo de usuario solo necesita introducir la relación de porcentaje de la mezcla y las dimensiones de la pastilla y el sistema automáticamente fabricará la muestra con las condiciones pedidas. La máquina cuenta con un sistema de detección de finalización de llenado para evitar sobrellenado del molde, además de paro automático para propósitos de seguridad. Es totalmente *touch* para facilitar su manejo y programación (figura 12).



Figura 12 Interfaz HMI para manejo de la máquina mezcladora.

Una vista preliminar de la máquina automatizada es mostrada en la figura 13, la cual muestra los diversos componentes incluyendo la etapa de control, potencia, interfaz de usuario, recipientes para dosificación, así como la etapa de moldeado y extrusión.



Figura 13 Máquina mezcladora de poliestireno y arcilla.

#### 4. Discusión

Una vez que se realizó la automatización, se procedió a fabricar diversas muestras para cotejar su repetitividad, de acuerdo a sus parámetros dimensionales, así como de sus propiedades dieléctricas, las cuales son de nuestro interés tanto las propiedades dieléctricas y como las de aislamiento eléctrico. En la figura 14 se observan 7 muestras obtenidas con la máquina automatizada, los materiales mezclados fueron poliestireno reciclado y triturado con arcilla tipo Dickita en diferentes proporciones.

Se hicieron mediciones dimensionales de las muestras para saber su repetitividad, se midió el espesor promedio (tomado en tres puntos de la muestra) y el diámetro promedio (tomado en direcciones perpendiculares) con un Vernier marca Mitutoyo, modelo CD-6" CSX con 10  $\mu\text{m}$  de resolución. También se calculó la repetitividad en función de la desviación estándar de todas las muestras y resultó ser buena.



Figura 14 Muestras de Poliestireno-arcilla obtenidas con la máquina.

Para las mediciones dieléctricas solo se tomó por ahora la constante dieléctrica y la impedancia de la muestra, ya que esas dos variables nos representan la capacidad de la muestra como material dieléctrico y la capacidad de la muestra como material aislante respectivamente. La figura 15 muestra el equipo LCR Agilent modelo E4980A con el que realizaron las mediciones anteriores.

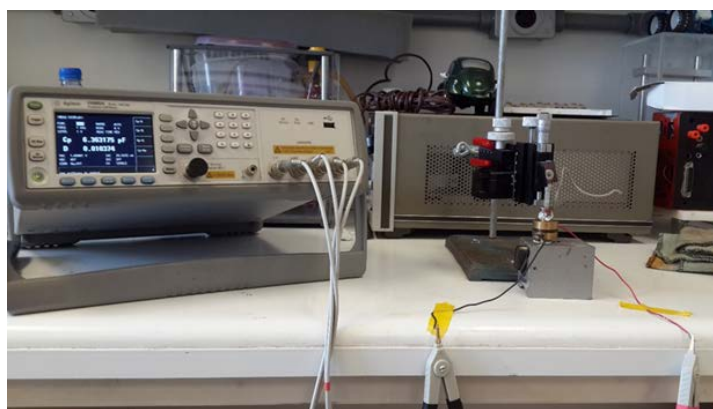


Figura 15 Mediciones de la constante dieléctrica e impedancia de las muestras.

En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos para valorar la calidad de las muestras al mezclar poliestireno reciclado con arcilla en la máquina automatizada.

Tabla 3 Datos obtenidos de las muestras.

No. muestra	Diámetro [mm]	Espesor [mm]	Peso [g]	Constante Dieléctrica $K = \frac{C_{dieléctrico}}{C_{vacío}}$	Impedancia Z [MΩ]	Ángulo θ [°]
1	25.18	3.12	1.61	1.24	25.29	-89.54
2	25.15	3.08	1.5	1.41	25.55	-89.41
3	25.18	3.10	1.58	1.49	24.33	-89.37
4	25.17	3.13	1.55	1.48	24.51	-89.28
5	25.18	3.08	1.51	1.42	25.53	-89.37
6	25.18	3.06	1.5	1.46	24.55	-89.39
7	25.18	3.10	1.53	1.44	24.90	-89.40
<b>Promedio</b>	25.1771428	3.09642857	1.54	1.42	24.951428	-89.394285
<b>Desviación Estándar</b>	0.00958314	0.02215437	0.03927	0.07837638	0.4709391	0.07148569

## 5. Conclusiones

La automatización de la máquina mezcladora e inyectora de poliestireno y arcilla fue un trabajo y aporte para al área de la automatización de procesos e investigación de materiales, ya que este trabajo permitirá facilitar el trabajo de preparación de muestras para análisis dieléctrico y mecánico de materiales compuestos. La principal ventaja de esta automatización es que aumentó el rendimiento del procesamiento de polímeros por inyección, el cual es el más utilizado por el gran número de cualidades que tiene a diferencia de otras técnicas de procesamiento. La lógica de programación con la que fue diseñada pudo adaptarse a las características de inyección de este tipo de mezclas. La repetitividad de las dimensiones de las muestras fue mejorada significativamente ya que se obtuvo una desviación estándar de 0.0095 en relación al diámetro y de 0.0221 en relación al espesor de las muestras. Es posible aún mejorarla más, ya que es la cualidad más importante por el tipo de caracterización dieléctrica y mecánica que requiere este tipo de materiales aplicados a la Ingeniería.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] J. G. Puente Córdova, E. Reyes Melo, "Materiales poliméricos dieléctricos". Ingenierías. Volumen XV. Número 57. Diciembre 2012. Páginas 29-37.

- [2] C. Il Córdoba, J. Gon Lim, "The fabrication of syndiotactic polystyrene/organophilic clay nanocomposites and their properties". *Polymer*, Volume X. Número VII. Febrero 2001. Páginas 7465-7475.
- [3] G. Peña Rodríguez, J. Sánchez molina, "Efecto de la concentración de Poliestireno expandido en la conductividad térmica efectiva de bloques de termoarcilla". *Revista Colombiana de Física*. Volumen 40. Número 2. Julio 2008.
- [4] A. Alvarado Iniesta, "Sistema neuro-difuso para el control de atributos de calidad de inyección en plásticos". Volumen 50. Número 2. Agosto 2013.
- [5] R. Grim Reynolds, *Clay mineralogy*. Second Edition. 1968. Mc Graw Hill. USA. Página 586.
- [6] S. Sánchez Valdés, I.G. Yáñez Flores, *Moldeo por inyección de termoplásticos*. Primera Edición. 2008. Limusa. México. Página 222.
- [7] C.L. Cadena Rueda. A. Meza Martínez. *Diseño de una máquina inyectora de plástico*. 2006. Universidad industrial de Santander Bucaramanga. Colombia. Página 119.
- [8] A. Alvarado Iniesta, J. García Alcaraz, "Optimization of injection molding process parameters by a hybrid of artificial neuronal network and artificial bee colony algorithm". Numero 67. Junio 2013. Páginas 43-51.
- [9] J. Girona Salgado, *Automatización de procesos mediante la guía GEMMA*. Primera Edición. 2005. UPC Editions. Páginas 94.

## **7. Autores**

Ing. Gustavo Cruz Guzmán es Ingeniero en Mecatrónica por el Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán, Estado de México. Actualmente estudia la maestría en Ingeniería bajo la línea de automatización y sustentabilidad en el Instituto Tecnológico de Querétaro, México.

M.C. Hernando Chagolla Gaona, es maestro en ciencias en Ingeniería Electrónica; Profesor Investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Querétaro. Maestría en Ingeniería en Automatización y

Sustentabilidad. Catedrático del Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro.

Dr. Domingo Rangel Miranda, es doctor en Ingeniería en el Área de Instrumentación y Control, es Responsable del Laboratorio de Instrumentación y Desarrollo del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM. Es Nivel 1 del Sistema Nacional de investigadores y sus líneas de interés están en la automatización e instrumentación para el procesamiento inteligente de materiales.

Dra. Genoveva Hernández Padrón, Ingeniero Químico, obtuvo los grados de maestría y doctorado en Ingeniería Química con especialidad en polímeros. Nivel 1 del Sistema Nacional de investigadores; sus líneas de interés son: síntesis, funcionalización y caracterización de polímeros.

M.T.A. Agustín Barrera Navarro. Profesor del Instituto Tecnológico de Querétaro desde el año 2005, adscrito al departamento de posgrado e investigación. Ha impartido cátedra en las carreras de electrónica, eléctrica, mecatrónica y materiales. Las áreas de interés en las que trabaja son control inteligente, electrónico, generación de energía y sistemas digitales. Ha participado como asesor de proyectos de residentes en diferentes empresas y centros de investigación.

C. Román Silva Peñaloza, estudiante de la licenciatura en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Querétaro con especialización en sistemas embebidos.



# **AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DIDÁCTICO PARA ESTUDIOS DE TIEMPOS Y MOVIMIENTOS**

***Miguel Magos Rivera***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

***José Antonio Lara Chávez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*jalch@correo.azc.uam.mx*

***Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*lwra@correo.azc.uam.mx*

***Jesús Loyo Quijada***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*lqj@correo.azc.uam.mx*

***Miguel Ángel López Ontiveros***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mlopez@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

En este artículo se describe la implementación de un sistema de automatización de dos bandas transportadoras empleadas como apoyo didáctico para el estudio de tiempos y movimientos en la UAM-Azcapotzalco. El sistema está basado en un Controlador Lógico Programable (PLC) con pantalla integrada, el cual permite la operación de las bandas bajo tres modos de funcionamiento. El modo de operación, así como los parámetros asociados al experimento, es especificado por el usuario mediante diversos menús de opciones disponibles en la pantalla del

controlador. Adicionalmente, el sistema despliega en la pantalla del controlador información de las principales variables asociadas al ejercicio como son: tiempos de ciclo, tiempos por estación, número de piezas elaboradas, etc. En paralelo al monitoreo en tiempo real de las variables, el sistema genera un archivo en Microsoft Excel para el posterior análisis de los datos. El sistema desarrollado amplió las capacidades de experimentación de los equipos existentes, hizo más eficiente su uso e incrementó la confiabilidad de los resultados que se obtienen.

**Palabra(s) Clave(s):** Automatización de procesos, bandas transportadoras, equipos de laboratorio, PLCs.

## **1. Introducción**

En los sistemas de producción actuales es necesario mantener un alto nivel competitivo para dar respuesta a las exigencias del mercado con efectividad. Una forma para lograr este objetivo es optimizando los recursos disponibles con el fin de incrementar la productividad. Esta situación conduce a la necesidad de conocer, estudiar y mejorar el comportamiento de las diferentes variables involucradas en los sistemas de manufactura.

Hablando específicamente del proceso productivo, etapa en la cual se genera valor agregado al producto o servicio, se presentan diferentes problemas en torno a su productividad: tiempo ocioso, demoras, acumulación de inventarios, mala programación de productos, flujo de producción errónea y exceso de personal, por mencionar solo algunos [1].

El estudio de tiempos y movimientos es un área de conocimiento dentro de la ingeniería que ha permitido minimizar tiempos y costos de producción, además de reducir tiempos improductivos tanto de maquinaria como de personal. Formalmente surge a principios del siglo XX perfeccionándose a través del tiempo y actualmente se considera como un instrumento necesario para el funcionamiento eficaz de la industria [2].

Uno de los principales beneficios del estudio de tiempos y movimientos es su aplicación en el balanceo de líneas, algunos de los objetivos de esta metodología es el distribuir adecuadamente las tareas sobre las estaciones de trabajo y la

eliminación de cuellos de botella. Con lo anterior se logra que el tiempo ocioso de una máquina o de un operario pueda ser minimizado [3]. Estos objetivos pueden ser analizados desde dos enfoques, el primero busca minimizar el número de estaciones de trabajo requerido para un tiempo de ciclo de producción dado. Mientras que en el segundo caso el objetivo es la minimización del tiempo de ciclo para un número de estaciones determinadas [4].

Diferentes trabajos se han llevado a cabo en torno a este tema, algunos a nivel de investigación [5], [6], [7], y otros en aplicaciones reales de casos industriales [8], [9], [10]. También se han desarrollado algoritmos para obtener, mediante simulaciones, soluciones óptimas de balanceo de líneas [11], [12], [13].

La formación de recursos humanos con sólidos conocimientos para realizar estudios de tiempos y movimientos, y su posterior aplicación en el balanceo de líneas de producción ha cobrado gran relevancia en las últimas décadas. Las instituciones de educación superior están incluyendo cursos relacionados con estas temáticas en sus programas de estudios. Las nuevas tendencias educativas en ingeniería se están orientando no sólo a la adquisición de conocimientos de tipo teóricos, sino también a la práctica y al manejo de equipos similares a los que los futuros ingenieros se encontrarán en la industria [14]. Para poder exponer a los estudiantes a situaciones reales durante su formación, se requiere que las instituciones de educación superior cuenten con equipos de experimentación los cuales, generalmente tienen costos elevados.

Existen en el mercado diversas compañías que se dedican a la fabricación y distribución de equipos didácticos para laboratorios de ingeniería entre las que podemos mencionar: Festo Didactic [15], De Lorenzo [16], Edibon [17], Mediatec [18] y Edutelsa [19], por mencionar algunos. La mayoría de estas empresas importan equipos desarrollados en otros países mismos que fueron diseñados bajo conceptos educativos distintos a los que se manejan en México. Aunado a lo anterior se tiene la dependencia total de refacciones y mantenimiento del extranjero además del alto costo de adquisición.

Desde hace más de 10 años la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco puso en práctica como

estrategia para resolver esta problemática el autoequipamiento. Esta opción, ha permitido desarrollar equipos más apropiados a las necesidades específicas de la institución, además de reducir considerablemente los costos de los mismos. Un beneficio adicional asociado al autoequipamiento es la acumulación de experiencia por parte de los participantes en el desarrollo de equipos dedicados a la experimentación [20], [21], [22], [23].

Bajo esta idea, se decidió automatizar dos sistemas de fabricación de productos, en los cuales se simula el montaje o elaboración de un bien. Estos equipos se encuentran en el Centro de Investigación y Formación Integral de Ingeniería Industrial (CIFIII) de la UAM-Azcapotzalco, y sirven como apoyo para la enseñanza de asignaturas relacionadas con el estudio y mejoramiento de la productividad en los procesos.

Al momento de iniciar el proyecto que se presenta en este trabajo, ambos sistemas eran operados de forma manual, lo anterior implicaba la intervención de un mínimo de 5 personas, por sistema, únicamente para el control y monitoreo del experimento.

En la segunda sección de este documento se describen las características principales del sistema desarrollado y se presentan las grandes partes que lo conforman. La tercera sección expone los elementos mecánicos del prototipo. La siguiente sección describe los dispositivos empleados para realizar el control y monitoreo del proceso. La sección 5 del artículo muestra la forma en que se enlazó el PLC a una computadora para realizar la adquisición de datos del proceso. Finalmente, en las dos últimas secciones del trabajo se presentan los resultados obtenidos, así como las conclusiones.

## **2. Descripción general del sistema desarrollado**

El CIFIII cuenta con diversos equipos didácticos entre los cuales se encuentran dos sistemas de fabricación de productos, constituidos cada uno por tres puestos de trabajo ubicados a lo largo de una banda transportadora, figura 1. En estos equipos se simula el montaje o elaboración, en tres pasos, de un producto. La pieza de base se coloca en un extremo de la banda la cual la transporta a cada

uno de los puestos de trabajo en donde se agrega un componente o realiza una operación, obteniendo de esta forma el producto terminado en el otro extremo de la banda.

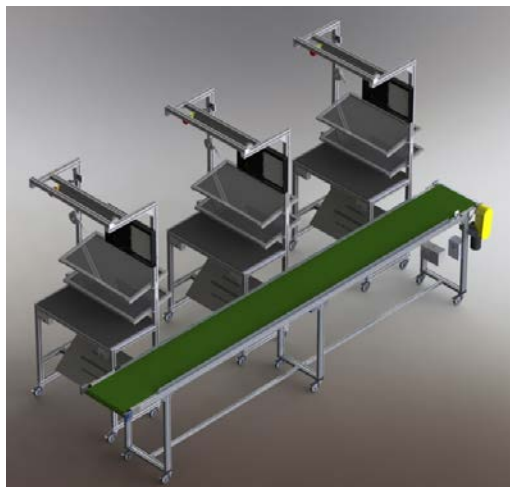


Figura 1 Vista de uno de los sistemas de fabricación del CIFIII.

El sistema desarrollado regula en forma automática la operación de la banda bajo tres modos de funcionamiento:

- **Tiempo fijo.** La banda transportadora permanece en una posición fija durante un tiempo establecido, dentro de este intervalo los operadores toman las piezas proporcionadas, realizan sobre estas la acción que le corresponde y las depositan de nuevo en el transportador. Transcurrido el tiempo especificado (tiempo ciclo), el motor de la banda se activa automáticamente para posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir.
- **Botones terminado.** La banda transportadora permanece en una posición fija hasta que cada uno de los tres operadores señaló, mediante un botón, que ha terminado la tarea correspondiente y que la pieza que trabajó ha sido devuelta a la banda. Al cumplirse esta condición, el motor de la banda se activa automáticamente para posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir.

- **Combinado.** La banda transportadora permanece en una posición fija hasta que una de las dos siguientes condiciones se cumpla: ha transcurrido el tiempo especificado o cada uno de los tres operadores señaló, mediante un botón, que ha terminado la tarea correspondiente y que la pieza que trabajó ha sido devuelta a la banda. Al cumplirse una de estas dos condiciones, el motor de la banda se activa automáticamente para posicionar las piezas frente al siguiente puesto. La secuencia se repite hasta completar el número de piezas a producir.

El sistema de automatización está basado en un Controlador Lógico Programable (PLC) que cuenta con una pantalla integrada. El modo de operación, así como los parámetros asociados al experimento, es especificado por el usuario mediante diversos menús de opciones disponibles en la pantalla del controlador. Además del botón de tarea terminada que existe en cada puesto de trabajo, cada operador tiene un botón de paro, el cual detiene la secuencia de operación del sistema.

Cada una de las bandas cuenta con su propio sistema de control lo que permite la operación independiente de estas. Sin embargo se tiene la opción de conectarlas en serie para tener un mayor número de puestos de trabajo y ensamblar de esta forma productos más complejos. Bajo esta forma de trabajo, los controladores se comunican entre sí mediante el protocolo Modbus IP, de tal manera que, desde el punto de vista del usuario, es como si se tuviese un sistema extendido con capacidad de operar hasta con seis puestos de trabajo.

Adicionalmente, el sistema despliega en la pantalla del controlador información de las principales variables asociadas al ejercicio como son: tiempos de ciclo, tiempos por estación, número de piezas elaboradas, etc. En paralelo al monitoreo en tiempo real de las variables, el sistema genera un archivo en Excel para el posterior análisis de los datos.

Con el objetivo de facilitar la explicación relacionada a la construcción del sistema, este puede dividirse en 3 bloques principales:

- Sistema Mecánico
- Control y Monitoreo

- Adquisición de Datos

En la figura 2, se muestran los bloques principales del sistema desarrollado.

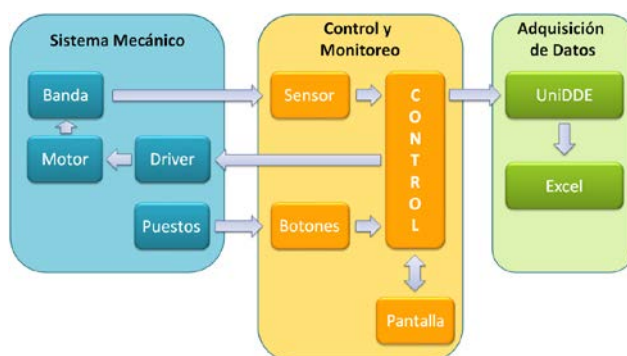


Figura 2 Diagrama de bloques del sistema desarrollado.

### 3. Sistema mecánico

Este bloque está compuesto básicamente por una banda transportadora y tres puestos de trabajo, cabe recordar que el proyecto se desarrolló para dos sistemas similares. Las bandas transportadoras, están elaboradas en base a perfiles modulares de aluminio y lona plástica. El dispositivo tiene una longitud de 450cm y 53 cm de ancho, con una altura de 100 cm. En el caso de la segunda banda se tienen las mismas dimensiones, solo la altura se reduce a 95 cm, lo anterior con la finalidad de facilitar el paso de un producto de una banda a la otra cuando estas se utilicen en serie. Cada una de las bandas cuenta con un motor modelo GP7400, de la marca Baldor, el cual es el encargado de proporcionar el movimiento de la lona. Se trata de un motor de 90 volts de DC de 1/8 hp. Como complemento se tiene un driver modelo BC140 de la misma compañía el cual se encarga de proporcionar la energía eléctrica necesaria para la operación del motor. Este elemento cuenta con una entrada de tipo digital que permite indicarle en forma externa que se desea mover al motor, misma que en este proyecto es controlada desde el PLC.

El segundo equipamiento que compone el bloque mecánico son los puestos de trabajo. Se trata de tres estaciones en las cuales cada uno de los usuarios se

encuentra instalado, cuenta con repisas en las cuales se encuentran los elementos a adicionar al ensamble o las herramientas necesarias si se trata de la fabricación de un producto. Al igual que la banda transportadora, los puestos de trabajo fueron fabricados en perfil de aluminio modular.

La figura 3 muestra en forma individual los elementos que conforman el bloque del sistema mecánico, puede observarse en el extremo derecho de la banda el motor de tracción y su respectivo driver.

#### 4. Control y monitoreo

El bloque encargado de controlar la activación de la banda transportadora con base en la configuración proporcionada por el usuario además del cumplimiento de una serie de condiciones externas, se muestra desglosado en la figura 4.

##### Controlador Lógico Programable

El elemento central de este bloque es un Controlador Lógico Programable (PLC) modelo Vision 130 de la marca Unitronics, el cual cuenta con 22 entradas digitales y 12 salidas de tipo relevador. Una característica importante de este aparato es que tiene integrado un panel compuesto por 20 teclas además de una pantalla blanco y negro de 2.4", en la cual es posible desplegar imágenes, texto y gráficos en tiempo real [24]. Del conjunto de entradas disponibles se emplearon 7 de ellas para introducir las señales externas: tres botones de tarea terminada, tres botones de paro y un sensor de pieza terminada. En la figura 5 se muestra el diagrama de conexiones del PLC con los elementos externos.



Figura 3 Puestos de trabajo y de la banda transportadora del sistema mecánico.



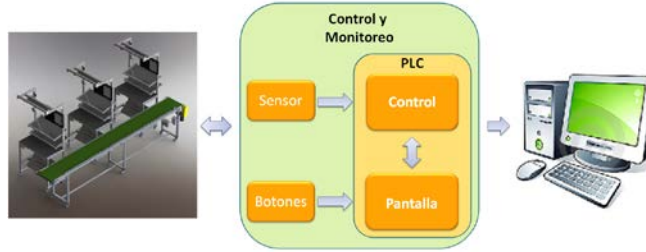


Figura 4 Diagrama de bloques del bloque de Control y Monitoreo.

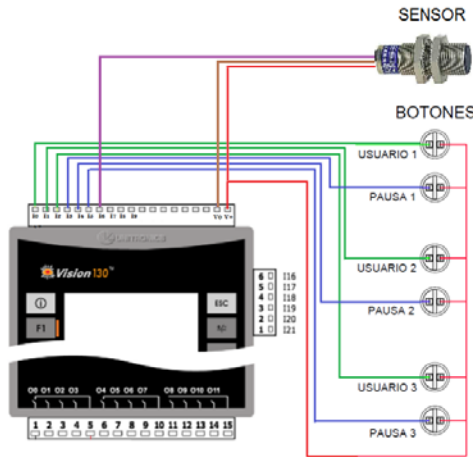


Figura 5 Diagrama de conexión del PLC y los elementos externos.

La configuración del sistema se realiza con ayuda de la pantalla y las teclas del controlador. Para esto fue elaborada una serie de desplegados que, en forma de menú, va apareciendo para que el usuario defina los parámetros que desea. La figura 6, muestra tres ejemplos de este tipo de pantallas.



Figura 6 Pantallas iniciales de programación de parámetros de operación.

Una vez que el sistema ha sido configurado y arranca la operación del mismo, aparece una pantalla que proporciona información del avance del ejercicio. La figura 7, muestra las pantallas de monitoreo para los tres modos de operación del sistema.



Figura 7 Pantallas de monitoreo para cada uno de los modos de operación.

La programación del controlador se realiza en lenguaje de escalera mediante el software Visillogic [25]. Una característica de este paquete es que al mismo tiempo que se elabora el programa de control, se desarrollan las pantallas a desplegar. La aplicación se basa en un grupo de subrutinas que dependiendo de ciertas condiciones se van ejecutando.

En la figura 8, se muestra el diagrama de flujo del programa principal del PLC. Se puede observar que dependiendo de los parámetros de operación especificados por el usuario, diversas subrutinas son ejecutadas.

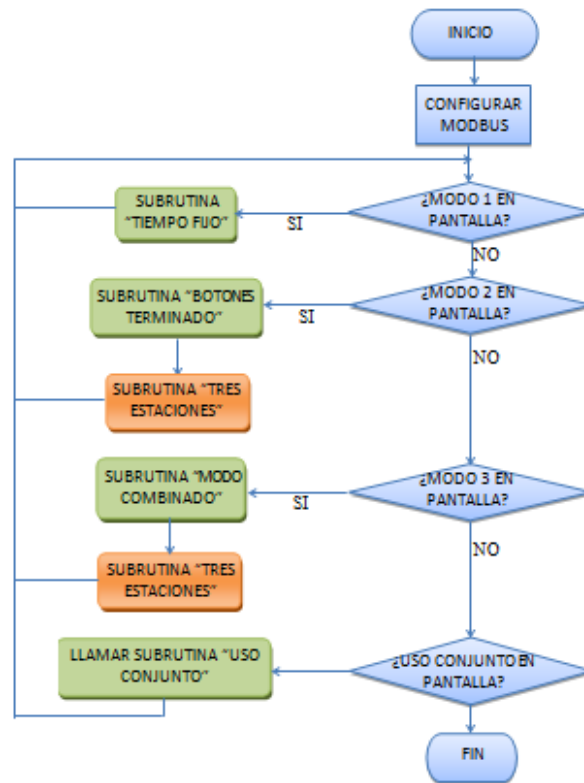


Figura 8 Diagrama de flujo del programa principal del PLC.

## Sensor

Con la finalidad de detectar cuando un producto sale de la banda transportadora, esto es, que ha finalizado su ensamble o fabricación, se instaló un sensor de presencia fotoeléctrico. Se eligió el sensor fotoeléctrico difuso modelo BR400-DDT-C-P de la marca Autonics. Este dispositivo tiene un rango de detección de 400mm, opera con 24 volts de DC, tiene una salida de colector abierto de transistor tipo PNP y es cilíndrico de tipo M18.



Figura 9 Sensor fotoeléctrico instalado en un extremo de la banda.

## Botones

Los últimos elementos de este bloque son los botones que se instalaron para que el usuario indique que ha terminado de realizar la tarea sobre la pieza o para detener la producción. Se eligieron botones de tipo momentáneo de uso industrial de la marca Eaton, modelo M22-D, compatibles con cables calibre 20-16 AWG que soportan hasta 4000 volts. La figura 10 muestra el pequeño gabinete en el cual se montaron los botones y que a su vez se colocó en la parte inferior del puesto de trabajo.



Figura 10 Botones de tarea terminada y de paro instalados en el puesto de trabajo.

## 5. Adquisición de datos

Este bloque es el encargado de medir y recopilar los tiempos de ciclo, tiempos de recorrido y de ensamble en cada una de las estaciones de trabajo.

Posteriormente, estos datos son trasferidos a una computadora en donde, con ayuda de la aplicación Microsoft Excel, se almacenan en archivos para su posterior análisis.

El software UniDDE es el encargado de tomar los datos que se encuentran almacenados en la memoria del PLC. Este programa, proporcionado por la empresa fabricante del controlador empleado, permite tomar los datos almacenados en la memoria del equipo y transferirlos a Microsoft Excel. En la aplicación desarrollada, el paquete se comunica con los controladores utilizando TCP/IP, mientras que con Microsoft Excel la comunicación se realiza mediante la herramienta de Windows Intercambio Dinámico de Datos (DDE, por sus siglas en inglés).

En la tabla 1, se muestra la hoja de Microsoft Excel con los datos de un experimento. Para la segunda banda transportadora, así como para el modo de operación en serie, se tiene tablas similares.

Tabla 1 Datos en Microsoft Excel con información de un experimento.

BANDA TRASPORTADORA "HENRY FORD"					
	Tiempo de Recorrido	Tiempo de Ensamble 1a Estación	Tiempo de Ensamble 2a Estación	Tiempo de Ensamble 3a Estación	Tiempo de Ensamble por Pieza
4	100	1214	318	181	1713
5	100	536	1297	388	2221
6	100	313	654	1366	2333
7	100	0	0	0	0
8	100	0	0	0	0

## 6. Resultados y discusión

Para cada uno de los dos sistemas desarrollados se construyeron igual número de tableros de control. En los cuales fueron instalados los controladores y elementos extras que permiten la operación del sistema. Se utilizó un gabinete metálico marca Himel modelo CRN-43/200 de 400 mm de alto por 300 mm de ancho y 200mm de profundidad. En la cara frontal del gabinete se colocó el PLC de tal forma que la pantalla es accesible desde el exterior sin necesidad de abrirlo. Cuenta en sus paredes laterales con un conector para la comunicación Ethernet con la computadora, un conector para la toma de energía eléctrica 120 volts de AC y un interruptor de encendido. Los cables de conexión de las señales de entrada

(botones y sensor) y de salida (control del Driver) se introducen al tablero por la parte superior del mismo. El aparato cuenta con una carátula impresa en vinil auto adherible que permite identificar al equipo y a las señales de los conectores. La figura 12 muestra una vista de uno de los tableros construidos.

Para facilitar la conexión de los distintos elementos que conforman el sistema, se colocaron conectores de señal en distintos puntos de la banda transportadora y de los puestos de trabajo. Con lo anterior se logra tener sistemas móviles que puedan adecuarse a los espacios disponibles. En la imagen derecha de la figura 13, se muestra uno de los conectores que recibe las señales de los botones en uno de los puestos de trabajo. Por otra parte, a la izquierda de la figura 13 se tiene la caja de registro en la cual se concentran todas las señales de llegada y salida del sistema que se conectan al tablero de control.



Figura 12 Vista de uno de los tableros construidos.



Figura 13 Conectores de señales del sistema construido.

Al momento de redactar este documento, los equipos llevan trabajando dos trimestres lectivos en los Laboratorios de Ingeniería Industrial de la UAM-Azcapotzalco, habiendo sido empleados por cerca de 100 estudiantes. Los

beneficios que se han observado hasta el momento son varios, podemos mencionar el número de ejercicios que se pueden realizar en una sesión. Anteriormente, al manejarse los equipos en forma manual solo era posible efectuar un experimento por sesión de 90 minutos. Al simplificarse el manejo, ahora pueden concluirse dos ejercicios por sesión. Anteriormente solo era posible realizar ejercicios del tipo: Tiempo Fijo, con la implementación realizada se tienen dos modos adicionales lo que permite que el balanceo de las líneas de ensamble sea más preciso. A lo anterior se debe agregar la confiabilidad de los resultados al realizarse la adquisición de estos en forma automática.

## **7. Conclusiones**

En este artículo se describió la implementación de un sistema de automatización de dos bandas transportadoras empleadas como apoyo didáctico en el estudio de tiempos y movimientos en la UAM-Azcapotzalco. El sistema desarrollado amplió las capacidades de experimentación de los equipos existentes, hizo más eficiente su uso e incrementó la confiabilidad de los resultados que se obtienen.

A partir de los comentarios vertidos por los usuarios de los sistemas, se plantea como trabajo a futuro remplazar el sensor fotoeléctrico difuso que detecta que una pieza ha sido concluida por un sensor fotoeléctrico de haz directo. Lo anterior debido a que, dependiendo de la posición en que el usuario coloca sobre la banda las piezas manipuladas y a la geometría de las mismas, en ocasiones estas no son detectadas correctamente. Por otro lado, debido a que la pantalla en la cual se realiza el monitoreo del proceso es demasiado pequeña 2.4", se encuentra en etapa de diseño un panel de mayor tamaño que permita a los usuarios observar desde sus puestos de trabajo su desempeño en tiempo real.

## **8. Bibliografía y Referencias**

- [1] J. Prokopenko, La gestión de la productividad. Manual Práctico. 1987. Ed. Limusa, Grupo Noriega Editores.
- [2] J. M. Arias-Reyna, Control de tiempos y productividad. La ventaja competitiva. 2000. Ed. Paraninfo Thomson Learning.

- [3] N. Kumar. D. Mahto, "Assembly Line Balancing: A Review of Developments and Trends in Approach to Industrial Application". *Global Journal of Researches in Engineering Industrial Engineering*. Vol. 13. No. 2. 2013. Pp. 29-50.
- [4] I. Kucukkoc, D. Zhang, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines". *Computers & Operations Research*. Vol. 64. 2015. Pp. 233-244.
- [5] O. Battaia, A. Dolgui, "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches". *International Journal of Production Economics*. Vol. 142. No. 2. 2013. Pp 259-277.
- [6] N. Boysen, M. Fliedner, A. Scholl, "A classification of assembly line balancing problems". *European Journal of Operational Research*. Vol. 183. No. 2. 2007. Pp. 674-693.
- [7] N. C. Wei, I.M. Chao, "A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem". *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 61 No. 3. 2011. Pp 824–830.
- [8] B. I. Rincón-Mora, I. J. C. Pérez-Olguín, J. A. Pérez-Limón, C. C. Fernández-Gaxiola, *Aplicación de técnicas de ingeniería industrial en el mejoramiento de un proceso de manufactura. Ingeniería de Procesos. Casos Prácticos. Edición 1. 2014. Ed. UTCJ. Pp. 6 -18.*
- [9] A. Arciniega-Moreno, I. J. C. Pérez-Olguín, J. Torres-Cantero, J. A. Pérez-Limón, *Estudio de Tiempos y Análisis de 8-Disciplinas Aplicados en la Reducción de Tiempos de Proceso. Ingeniería de Procesos. Casos Prácticos. Edición 1. 2014. Ed. UTCJ. Pp. 19-27.*
- [10] O. Battaia, A. Dolgui, N. Guschinsky, G. Levin, "Optimal design of machines processing pipeline parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 63. 2012. Pp 963–973.
- [11] S. M. Ramírez-Campos, G. González-Múzquiz, M. O. González-Flores, "Un caso real de balanceo de líneas de ensamble con restricciones de secuencias de subprocesos resuelto con un modelo genético". *Revista de la Ingeniería Industrial*. Vol. 4. 2010. Pp. 1-14.

- [12] J. H. Restrepo, P. Medina, E. Cruz, "Problemas de balanceo de línea SALBP-1 y SALBP-2: Un caso de estudio". *Scientia et Technica*. Vol. 14. No. 40. 2008. Pp. 105-110.
- [13] H. Zupan, N. Herakovic, "Production line balancing with discrete event simulation: A case study". *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Vol. 48. No. 3. 2015.
- [14] J. L. Guzman, S. Dormido, M. Berenguel, "Interactivity in education: An experience in the automatic control field". *Computer Application on Engineering Education*. Vol. 21. No. 2. pp 360-371. June 2013.
- [15] <http://www.festo-didactic.com/mx-es/mexico/>. Julio 2016.
- [16] <http://www.delorenzo.com.mx/>. Julio 2016.
- [17] <http://www.silimit.com.mx/productos/equipos-didacticos>. Julio 2016.
- [18] <http://www.grupo-mediatec.com/>. Julio 2016.
- [19] <http://edutelsa.com/>. Julio 2016.
- [20] R. Alcántara, R. Barrales, "Integración de Labview a un prototipo didáctico para la enseñanza de la medición de parámetros propios de la industria de procesos". Reunión de Verano IEEE, Acapulco, Gro. México. Julio 2006.
- [21] M. Magos, L. Delgado, "Banco de tanques para realizar prácticas de Laboratorio de Ingeniería Química". XXXIII Encuentro Nacional de la Asociación Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. San José del Cabo, BCS. México. Mayo 2012.
- [22] M. Magos, R. Godínez, D. Mendieta, "Equipo didáctico para control y monitoreo de temperatura". X Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Panamá City, Panamá. July 2012.
- [23] M. Magos, R. Godínez, I. Siller, R. Alcántara, J. Ponce, "Simulador de trayectorias solares para aplicación en arquitectura". XXXIX Semana Nacional de Energía Solar. Campeche, México. Octubre 2015.
- [24] Vision OPLC V130-33-R64 Technical Specifications and Installation Guide. Unitronics. USA. 2010.
- [25] VisiLogic Software Manual. Unitronics. USA. 2010.



## **8. Autores**

Ing. José Antonio Lara Chávez. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana y actualmente es ayudante del Departamento de Electrónica de la misma Institución.

Dr. Miguel Magos Rivera. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro y Doctor en Control Automático por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia). Actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Dr. Miguel Ángel López Ontiveros. Es Ingeniero Industrial por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro en Sistemas por el Instituto Politécnico Nacional y Doctor en Ingeniería Industrial por el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (Francia). Actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Ing. Jesús Loyo Quijada. Es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Dra. Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado. Es Ingeniera Industrial por la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI-Managua, Nicaragua). Estudió una Maestría en Ingeniería en Manufactura en el Instituto Politécnico Nacional de México y posteriormente estudió el doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica en esta misma institución. Es docente de la carrera de ingeniería industrial de la Universidad Autónoma Metropolitana e investigador del área de innovación de sistemas de esta misma universidad. Sus áreas de interés son: modelado y simulación de sistemas productivos, mejora continua, comportamiento dinámico de sistemas.

# MODELO DE UN SISTEMA MÁQUINA BUS INFINITO USANDO EXPANSIÓN PARCIAL EN SERIES DE POTENCIA Y EL MÉTODO DE FORMAS NORMALES

***Irma Martínez Carrillo***

Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex  
*imartinezca@uaemex.mx*

***Carlos Juárez Toledo***

Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex,  
*cjuarez@uaemex.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se propone un modelo analítico basado en el método de formas normales para representar el comportamiento de un sistema máquina bus infinito (MBI). En esta propuesta se plantea la posibilidad de expandir parcialmente en series de potencia la no linealidad de un sistema representado por ecuaciones diferenciales ordinarias con la finalidad de conservar lo más posible la forma original del sistema de estudio.

Para verificar la confiabilidad del método propuesto, se presenta una comparación con la solución numérica del comportamiento original del sistema de estudio mediante herramienta Matlab, se utilizan tres diferentes parámetros de potencia mecánica como señales de entrada.

**Palabras Claves:** Expansión en series de potencia, formas normales, máquina bus infinito, potencia mecánica.

## **1. Introducción**

Las ecuaciones que representan el comportamiento natural de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), contienen no linealidades que dificulta la obtención

de un modelo analítico que permita conocer e identificar la interacción de sus variables con el resto del sistema.

Actualmente han surgido herramientas analíticas no lineales como lo es el método de formas normales de segundo, tercer orden u orden superior [1, 2, 3]. Convencionalmente la aplicación del método requiere la expansión en series de potencia del sistema original, una desventaja visible es que se pierde información relevante de parámetros constantes como lo es la potencia mecánica; En este trabajo se propone un método analítico, donde se expande en series de potencia parcialmente la no linealidad del sistema original con la finalidad preservar lo más posible las ecuaciones dinámicas que representan el comportamiento original del sistema.

## 2. Desarrollo

Para el modelo clásico de un SEP como el que se muestra en la figura 1, las ecuaciones que representan la dinámica del sistema MBI están descritas por las ecuaciones 1 y 2.

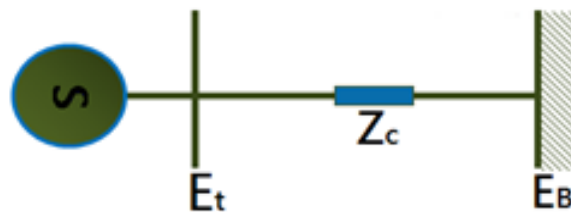


Figura 1 Diagrama esquemático de un sistema MBI. [4]

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \omega \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} [P_m - D\omega - P_{max} \sin(\delta)] \quad (2)$$

Las características de los elementos que intervienen en las ecuaciones 1 y 2 se muestran en la tabla 1.

Definiendo el vector de estados como  $x = [x_1 \ x_2]^T = [\delta \ \omega]^T$  mientras que la potencia mecánica ( $P_m$ ) es una señal de entrada.

Tabla 1. Elementos del SEP.

Símbolo	Elemento	Unidad de medida
$\delta$	Posición angular del rotor	radianes
$\omega$	Velocidad angular del rotor	radianes/segundo
$P_m$	Potencia mecánica	p. u.
$D$	El coeficiente de amortiguamiento	p. u.
$H$	Constante de inercia	segundos

### Introducción a las formas normales

El método de formas normales es una herramienta para el análisis y estudio del comportamiento de sistemas descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales alrededor de un punto de interés [5,6], ecuación 3.

$$\dot{x} = f(x) = \sum_{i=1}^{\infty} f_i(x) \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad x \in \mathcal{R}^n, \quad f: \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}^n \quad (3)$$

Donde  $x$  es el vector de estados del sistema y  $f(x)$  representa un campo vectorial el cual contiene términos lineales y no lineales [7]. Se considera que (3) es continuo, entonces la expansión en series de potencia de (3) es representado por la ecuación 4.

$$\dot{x} = f_{lin} + f_{nolin} = Ax + \sum_{i=2}^k f_i(x) + O(\|x\|^{k+1}) \quad (4)$$

Con  $f_{lin}(x) = f_1(x) = Ax = Df(x)|_{x=x_0}$  el cual contiene la parte lineal del campo vectorial original y  $f_{nolin} = \sum_{i=2}^k f_i(x)$  contiene la parte no lineal del campo vectorial; cada  $f_i(x)$  es un vector de expresiones analíticas que contiene funciones polinomiales de grado  $i$  en  $x$ , para  $i \geq 2$  [8].

De forma esquemática la figura 2, muestra la implementación del método.

Donde los coeficientes de la transformada en formas normales de segundo y tercer orden están dados por la ecuación 5, [10].

$$h_{2kl}^j = \frac{C_{2kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j}, \quad h_{32klm}^j = \frac{C_{3kl}^j}{\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m - \lambda_j}, \dots \quad (5)$$

Para  $j=1,2,\dots,n$  donde  $\lambda_k + \lambda_l - \lambda_j \neq 0$ ,  $\lambda_k + \lambda_l + \lambda_m - \lambda_j \neq 0$ ,  $C_{2kl}^j$  y  $C_{3kl}^j$  son generadas por la no linealidad de segundo u orden mayor.

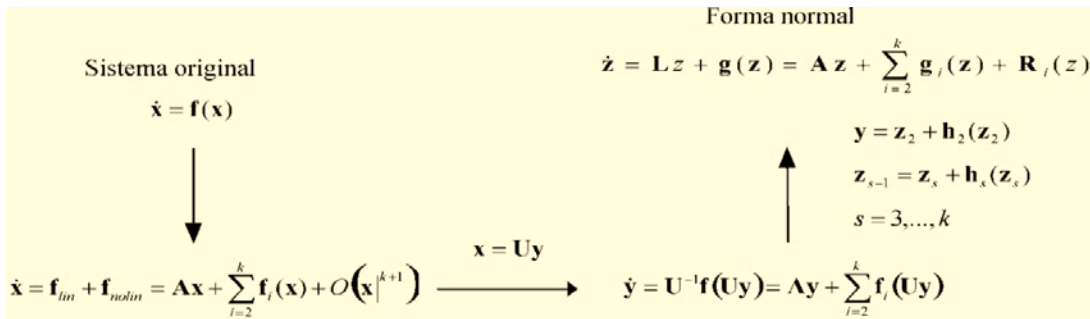


Figura 2 Representación esquemática del método de formas normales. [9]

### Implementación parcial de método de formas normales

Para la implementación del método propuesto, considérese la ecuación 2, ya que contiene un parámetro no lineal como se muestra en la figura 3.

Figura 3 Tipificación no lineal del comportamiento dinámico del sistema.

Expandiendo en series de potencia de tercer orden la función no lineal alrededor de  $\delta=0$  en la ecuación 2, resulta la ecuación 6.

$$\text{sen}(\delta) \approx \delta - \frac{1}{3!} \delta^3 \quad (6)$$

Sustituyendo ecuación 6 en ecuación 2, se obtiene una función equivalente de (2), con no linealidad de tercer orden de la forma en que se aprecia en la ecuación 7.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} \left[ P_m - D\omega - P_{max} \left[ \delta - \frac{1}{3!} \delta^3 \right] \right] \quad (7)$$

Como puede observarse en la ecuación 7, la no linealidad que se origina es de tercer orden, es decir, no contiene términos no lineales de segundo orden, produciendo una representación matricial equivalente como la mostrada en la ecuación 8.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \frac{d\delta}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} &\approx \begin{bmatrix} 0 & \omega_o \\ -\frac{P_{max}}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{P_{max}}{2H} \delta^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P_m}{2H} \end{bmatrix} \\ \dot{x} &\approx Ax + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} x^T H_{3_1} \begin{bmatrix} x & \bar{0} \\ \bar{0} & x \end{bmatrix} x \\ x^T H_{3_2} \begin{bmatrix} x & \bar{0} \\ \bar{0} & x \end{bmatrix} x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P_m}{2H} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Donde  $x = [\delta \ \omega]^T = [x_1 \ x_2]^T$ ,  $A$  contiene los términos lineales del sistema, mientras  $H_{3_1}$  y  $H_{3_2}$  contiene los términos originados de tercer orden. La aplicación de una primera transformación lineal permite identificar en forma explícita el efecto de los parámetros del sistema en la evolución de cada eigenvalor de interés [10]. Con objeto de permitir una mejor comprensión del modelo propuesto se hace uso de la transformación lineal  $x=Uy$  en (8) para obtener la forma canónica de Jordan con eigenvalores  $\lambda_1, \lambda_2$ , resultando la ecuación 9.

$$\dot{y} = U^{-1}AUy + \frac{1}{3!}U^{-1} \begin{bmatrix} (Uy)^T H_{3_1} \begin{bmatrix} Uy & \bar{0} \\ \bar{0} & Uy \end{bmatrix} Uy \\ (Uy)^T H_{3_2} \begin{bmatrix} Uy & \bar{0} \\ \bar{0} & Uy \end{bmatrix} Uy \end{bmatrix} + U^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P_m}{2H} \end{bmatrix} = \Lambda y + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} F_{3_1}(y) \\ F_{3_2}(y) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

En donde  $y \in C^n$  es el vector de variables de Jordan,  $F_{3_1}(y)$  y  $F_{3_2}(y)$  contienen funciones pólinoimiales de tercer orden y  $F_c$  incluye la potencia mecánica como parte del modelo. El objetivo de la implementación del método de formas normales, es eliminar las no linealidades de segundo, tercer u orden superior, por lo tanto, se introduce la transformación no lineal de la ecuación 10.

$$y = \begin{bmatrix} z_{3_1} \\ z_{3_3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 z_{3_1}^3 + c_2 z_{3_1}^2 z_{3_2} + c_3 z_{3_1} z_{3_2}^2 + c_4 z_{3_2}^3 \\ c_5 z_{3_1}^3 + c_6 z_{3_1}^2 z_{3_2} + c_7 z_{3_1} z_{3_2}^2 + c_8 z_{3_2}^3 \end{bmatrix} = z_3 + h_3(z_3) \quad (10)$$

Sustituyendo ecuación 10 en ecuación 9, resulta la ecuación 11.

$$\begin{aligned} \dot{z}_3 &= [I - Dh_3(z_3)] \left[ \Lambda [z_3 + h_3(z_3)] + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} F_{3_1}(z_3 + h_3(z_3)) \\ F_{3_2}(z_3 + h_3(z_3)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_c \end{bmatrix} \right] \\ &= \Lambda z_3 + \Lambda h_3(z_3) + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} F_{3_1}(z_3) \\ F_{3_2}(z_3) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ F_c \end{bmatrix} - Dh_3(z_3) \Lambda z_3 + O^s \end{aligned} \quad (11)$$

Donde  $O^s$  representa todos los términos de cuarto orden y superior, que no podrán ser eliminados, y por lo tanto, para la implementación de este método se considera despreciable [11].

De la ecuación 11, supóngase que existen coeficientes  $c_1, c_2, \dots, c_8$  que satisfacen la relación, ecuación 12.

$$\frac{1}{3!} \begin{bmatrix} F_{3_1}(z_3) \\ F_{3_2}(z_3) \end{bmatrix} = Dh_3(z_3)\Lambda z_3 - \Lambda h_3(z_3) \quad (12)$$

Por lo tanto, cada uno de los coeficientes de tercer orden es obtenido mediante la ecuación 5. Una vez eliminados los términos no lineales de tercer orden se obtiene la representación de la ecuación 13.

$$\dot{z}_3 = \Lambda z_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ F_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para obtener una representación analítica del modelo, considérese las condiciones iniciales de tercer orden que computacionalmente tiene la solución  $x = Uy \Rightarrow y = U^{-1}x_0$  para condiciones iniciales  $x_0$  y que además satisface la ecuación 10, de tal forma, ecuación 14.

$$y = z_3 + h_3(z_3) \Rightarrow U^{-1}x_0 = z_3 + h_3(z_3) \quad (14)$$

De la solución de (14), son obtenidas las condiciones iniciales de tercer orden  $z_{3_1}^0$  y  $z_{3_2}^0$ .

Aplicando transformada de Laplace a ecuación 13 para un sistema matricial no homogéneo [12] se obtiene la ecuación 15.

$$z_3(t) = \ell^{-1}[z_3(s)] = \ell^{-1} \left[ [sI - \Lambda]^{-1} \left[ z_3^0 + \begin{bmatrix} 0 \\ F_c(s) \end{bmatrix} \right] \right] = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} \\ e^{-\lambda_2 t} \end{bmatrix} z_3^0 + \begin{bmatrix} f_3^1(t) \\ f_3^2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde  $F_c(s)$  contiene parámetros de la potencia mecánica, como la potencia mecánica es una señal de entrada, considérese  $P_m(s) = \frac{K}{s}$ , para  $K$  un valor constante en un intervalo de tiempo.

Sustituyendo de forma regresiva en ecuación 10 resulta ecuación 16

$$y(t) = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda_2 t} \end{bmatrix} z_3^0 + \begin{bmatrix} f_3^1(t) \\ f_3^2(t) \end{bmatrix} + h_3 \left( \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} \\ e^{-\lambda_2 t} \end{bmatrix} z_3^0 + \begin{bmatrix} f_3^1(t) \\ f_3^2(t) \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda_2 t} \end{bmatrix} z_3^0 + \begin{bmatrix} g_3^1(t) \\ g_3^2(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Con  $g_3^1(t)$  y  $g_3^2(t)$  funciones generadas por las no linealidades de tercer orden del sistema, El último paso en este proceso es la obtención de soluciones analíticas en coordenadas físicas. Aplicando la transformación,  $x=Uy$ , se obtiene ecuación 17.

$$x(t) = U \left[ \begin{bmatrix} e^{-\lambda_1 t} & 0 \\ 0 & e^{-\lambda_2 t} \end{bmatrix} z_3^0 + \begin{bmatrix} g_3^1(t) \\ g_3^2(t) \end{bmatrix} \right] = f_{lineal}(t) + f_{no\ lineal}(t) \quad (17)$$

Las soluciones analíticas de ecuación 17 tienen una interpretación física de interés, ya que la parte lineal contiene la participación individual de cada uno de los parámetros con el resto del sistema, mientras que la parte no lineal contiene la relación entre los parámetros del modelo de estudio.

### 3. Resultados

El sistema de estudio se muestra en la figura 4, este sistema representa una planta generadora ubicada en una región distante, la cual está compuesta por cuatro generadores de 555 MVA, 24 kV y 60 Hz, transmitiendo potencia a través de un enlace radial a un sistema de gran dimensión representado por un bus infinito [13].

Para propósitos de estudio, el sistema se representó mediante un modelo clásico; se desprecia la resistencia de enlace de transmisión y el comportamiento dinámico del generador se representa mediante la ecuación de oscilación con amortiguamiento.

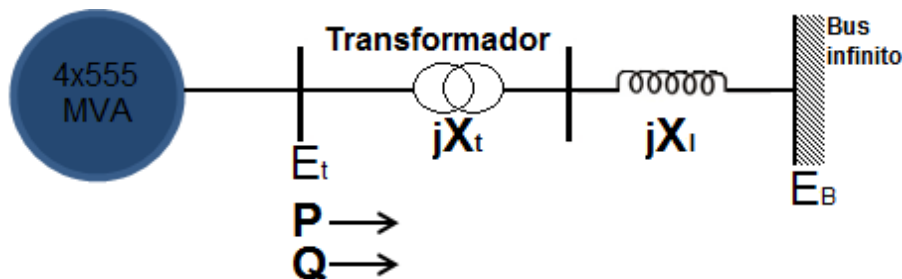


Figura 4 Diagrama unifilar del sistema de estudio [4].



## Parámetros de la máquina

Los parámetros de la máquina y la red son 2220 MVA base siendo los siguientes:

$$H=3.5MWs/MVA, D=10p.u., X'_d=0.30p.u.$$

Parámetros del sistema de transmisión:

$$P=0.9p.u., Q=0.30p.u., E_t=1.00\angle 36^\circ, E_B=0.995\angle 0^\circ, P_{max}=1.1762.$$

## Equivalencia no lineal del sistema MBI original.

$$f_{lineal}(t) = \left( \begin{aligned} & (pm^*e^{(1t)}(1.752*10^{-17} - 3.397i) + 0.9998*11*z31^*e^{(1t)} + 0.9998*11*z32^*e^{(2t)} + pm^*(3.397i - 1.752*10^{-17}))/11 + \\ & (11*pm^*(1.752*10^{-17} - 3.397i) + 11*pm^*e^{(2t)}(3.397i - 1.752*10^{-17}))/((11^2) \\ & - (1.0*(pm^*(0.07143 - 0.006436i) + pm^*e^{(2t)}(0.006436i - 0.07143) + l2^*z31^*e^{(1t)}(0.001894 - 0.02102i) + \\ & l2^*z32^*e^{(2t)}(0.02102i + 0.001894))/l2 - (1.0*(l2^*pm^*(0.006436i + 0.07143) + l2^*pm^*e^{(1t)}(-0.006436i - 0.07143))/((11^2) \end{aligned} \right)$$

$$f_{nolineal}(t) =$$

$$\begin{aligned} & z31^3e^{(311t)}(-0.001311i - 0.0001379) + z32^3e^{(312t)}(0.001311i - 0.0001379) + (pm^3(0.005411i - 0.05141))/l1^3 + (pm^3(-0.005411i - \\ & 0.05141))/l2^3 + (pm^3e^{(311t)}(0.05141 - 0.005411i))/l1^3 + (pm^3e^{(312t)}(0.005411i + 0.05141))/l2^3 + (pm^3e^{(11t)}(0.1542 - 0.01623i))/l1^3 + \\ & (pm^3e^{(12t)}(0.01623i + 0.1542))/l2^3 + (pm^3(1.153i - 8.268*10^{-19}))/((l1^2)^2) + (pm^3(3.484*10^{-17} - 1.153i))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^3e^{(211t)}(0.01623i - 0.1542))/l1^3 + (pm^3e^{(212t)}(-0.01623i - 0.1542))/l2^3 + (pm^2z31^*e^{(11t)}(0.04539i + 0.004778))/l1^2 + \\ & (pm^2z31^*e^{(11t)}(0.3393 - 1.506*10^{-18}i))/l2^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(8.505*10^{-18}i + 0.3393))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(0.004778 - \\ & 0.04539i))/l2^2 + z31^*z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(4.336*10^{-19}i - 0.02939) + z31^2z32^*e^{(12t)}e^{(211t)}(-4.336*10^{-19}i - 0.02939) + \\ & (pm^*z31^2e^{(211t)}(0.01336 - 0.001406i))/l1 + (pm^2z31^*e^{(211t)}(-0.09079i - 0.009555))/l1^2 + (pm^*z31^2e^{(211t)}(0.09985i - 1.988*10^{-18}))/l2 \\ & + (pm^*z32^2e^{(212t)}(-0.09985i - 9.583*10^{-19}))/l1 + (pm^*z32^2e^{(212t)}(0.001406i + 0.01336))/l2 + (pm^2z32^*e^{(212t)}(0.09079i - \\ & 0.009555))/l2^2 + (pm^3e^{(11t)}(8.268*10^{-19} - 1.153i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}(2.305i - 6.969*10^{-17}))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}(1.654*10^{-18} - \\ & 2.305i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}(1.153i - 3.484*10^{-17}))/((l1^2)^2) + (pm^*z31^2e^{(311t)}(0.001406i - 0.01336))/l1 + (pm^2z31^*e^{(311t)}(0.04539i + \\ & 0.004778))/l1^2 + (pm^*z32^2e^{(312t)}(-0.001406i - 0.01336))/l2 + (pm^2z32^*e^{(312t)}(0.004778 - 0.04539i))/l2^2 + (pm^3e^{(211t)}(3.484*10^{-17} - \\ & 1.153i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(212t)}(1.153i - 8.268*10^{-19}))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}e^{(12t)}(2.305i - 1.654*10^{-18}))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^3e^{(11t)}e^{(12t)}(6.969*10^{-17} - 2.305i))/((l1^2)^2) + (pm^2z31^*e^{(211t)}(1.701*10^{-17}i + 0.6785))/((l1^2)^2) + (pm^2z32^*e^{(212t)}(0.6785 - \\ & 3.013*10^{-18}i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}e^{(212t)}(8.268*10^{-19} - 1.153i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}e^{(211t)}(1.153i - 3.484*10^{-17}))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(-1.701*10^{-17}i - 0.6785))/l1^2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(12t)}(3.013*10^{-18}i - 0.6785))/l2^2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}(-1.701*10^{-17}i - \\ & 0.6785))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(3.013*10^{-18}i - 0.6785))/l1^2 + (pm^*z32^2e^{(11t)}e^{(212t)}(0.09985i + 9.583*10^{-19}))/l1 + \\ & (pm^2z32^*e^{(12t)}e^{(211t)}(8.505*10^{-18}i + 0.3393))/l1^2 + (pm^*z31^2e^{(12t)}e^{(211t)}(1.988*10^{-18} - 0.09985i))/l2 + \\ & (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(212t)}(0.3393 - 1.506*10^{-18}i))/l2^2 + (pm^*z31^2z32^*e^{(211t)}(0.1997i - 3.976*10^{-18}))/l1 + \\ & (pm^2z31^*z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(-0.1997i - 1.917*10^{-18}))/l2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(12t)}(1.701*10^{-17}i + 0.6785))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.6785 - \\ & 3.013*10^{-18}i))/l1^2 + (pm^2z31^*e^{(12t)}e^{(211t)}(-1.701*10^{-17}i - 0.6785))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(3.013*10^{-18}i - \\ & 0.6785))/l1^2 + (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(3.976*10^{-18} - 0.1997i))/l1 + (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.1997i + 1.917*10^{-18}))/l2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & z31^3e^{(311t)}(9.223*10^{-6} - 1.252*10^{-6}i) + z32^3e^{(312t)}(1.252*10^{-6}i + 9.223*10^{-6}) + (pm^3(-0.0003618i - 4.91*10^{-5}))/l1^3 + \\ & (pm^3(0.0003618i - 4.91*10^{-5}))/l2^3 + (pm^3e^{(311t)}(0.0003618i + 4.91*10^{-5}))/l1^3 + (pm^3e^{(312t)}(4.91*10^{-5} - 0.0003618i))/l2^3 + \\ & (pm^3e^{(11t)}(0.001085i + 0.0001473))/l1^3 + (pm^3e^{(12t)}(0.0001473 - 0.001085i))/l2^3 + (pm^3(0.002184i + 0.02424))/((l1^2)^2) + (pm^3(0.02424 - \\ & 0.002184i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(211t)}(-0.001085i - 0.0001473))/l1^3 + (pm^3e^{(212t)}(0.001085i - 0.0001473))/l2^3 + \\ & (pm^2z31^*e^{(11t)}(4.335*10^{-5}i - 0.0003194))/l1^2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}(0.0006428 - 0.007133i))/l2^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(0.007133i + \\ & 0.0006428))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(-4.335*10^{-5}i - 0.0003194))/l2^2 + z31^*z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(0.0006179i - 5.568*10^{-5}) + \\ & z31^2z32^*e^{(12t)}e^{(211t)}(-0.0006179i - 5.568*10^{-5}) + (pm^*z31^2e^{(211t)}(9.401*10^{-5}i + 1.276*10^{-5}))/l1 + (pm^2z31^*e^{(211t)}(0.0006389 - \\ & 8.671*10^{-5}i))/l1^2 + (pm^*z31^2e^{(211t)}(0.0001892i - 0.002099))/l2 + (pm^*z32^2e^{(212t)}(-0.0001892i - 0.002099))/l1 + \\ & (pm^*z32^2e^{(212t)}(1.276*10^{-5} - 9.401*10^{-5}i))/l2 + (pm^2z32^*e^{(212t)}(8.671*10^{-5}i + 0.0006389))/l2^2 + (pm^3e^{(11t)}(-0.002184i - \\ & 0.02424))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}(0.004368i - 0.04848))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}(-0.004368i - 0.04848))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}(0.002184i - \\ & 0.02424))/((l1^2)^2) + (pm^*z31^2e^{(311t)}(-9.401*10^{-5}i - 1.276*10^{-5}))/l1 + (pm^2z31^*e^{(311t)}(4.335*10^{-5}i - 0.0003194))/l1^2 + \\ & (pm^*z32^2e^{(312t)}(9.401*10^{-5}i - 1.276*10^{-5}))/l2 + (pm^2z32^*e^{(312t)}(-4.335*10^{-5}i - 0.0003194))/l2^2 + (pm^3e^{(211t)}(0.02424 - \\ & 0.002184i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(212t)}(0.002184i + 0.02424))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}e^{(12t)}(0.004368i + 0.04848))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^3e^{(11t)}e^{(12t)}(0.04848 - 0.004368i))/((l1^2)^2) + (pm^2z31^*e^{(211t)}(0.01427i + 0.001286))/((l1^2)^2) + (pm^2z32^*e^{(212t)}(0.001286 - \\ & 0.01427i))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(11t)}e^{(212t)}(-0.002184i - 0.02424))/((l1^2)^2) + (pm^3e^{(12t)}e^{(211t)}(0.002184i - 0.02424))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(-0.01427i - 0.001286))/l1^2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.01427i - 0.001286))/l2^2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}(-0.01427i - \\ & 0.001286))/l1^2 + (pm^2z32^*e^{(12t)}(0.01427i - 0.001286))/l1^2 + (pm^*z32^2e^{(11t)}e^{(212t)}(0.0001892i + 0.002099))/l1 + \\ & (pm^2z32^*e^{(12t)}e^{(211t)}(0.007133i + 0.0006428))/l1^2 + (pm^*z31^2e^{(12t)}e^{(211t)}(0.002099 - 0.0001892i))/l2 + \\ & (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(212t)}(0.0006428 - 0.007133i))/l2^2 + (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.0003784i - 0.004199))/l1 + (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(- \\ & 0.0003784i - 0.004199))/l2 + (pm^2z31^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.01427i + 0.001286))/((l1^2)^2) + (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.001286 - 0.01427i))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^2z31^*e^{(12t)}e^{(211t)}(-0.01427i - 0.001286))/((l1^2)^2) + (pm^2z32^*e^{(11t)}e^{(212t)}(0.01427i - 0.001286))/((l1^2)^2) + \\ & (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.004199 - 0.0003784i))/l1 + (pm^*z31^2z32^*e^{(11t)}e^{(12t)}(0.0003784i + 0.004199))/l2 \end{aligned}$$

Utilizando los datos nominales del sistema de estudio en (8) se obtiene la representación matricial de la forma ecuación 18

$$\begin{bmatrix} \frac{d\delta}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 120\pi \\ -\frac{1.1762}{7} & -\frac{10}{7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} + \frac{1}{3!} \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1.1762}{7} \delta^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{7} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Donde la potencia mecánica  $P_m$  se considerara como una señal de entrada constante  $k$  aplicada. Siguiendo la metodología propuesta, para el modelo de estudio se consideraran las señales de entrada de la tabla 2, y sus respectivas condiciones iniciales.

Tabla 2. Condiciones iniciales ante una señal de entrada del sistema de estudio.

Señal de entrada	Condiciones iniciales		
	$\lambda$	$x_0$	$z_3^0$
$P_m = 0.200u(t)p.u.$	$-0.714 \pm 7.926i$	$[15^\circ 0]^T$	$0.131 \pm 0.012i$
$P_m = 0.259u(t)p.u.$			
$P_m = 0.270u(t)p.u.$			

A partir de las condiciones iniciales de la tabla 2, se procedió a llevar a cabo la implementación del método propuesto en la sección 2.3. Para comprobar la validez de los resultados se programó la solución numérica del sistema de ecuaciones originales en (1) y (2) y se compararon los resultados con la metodología propuesta de las figuras 5, 6 y 7.

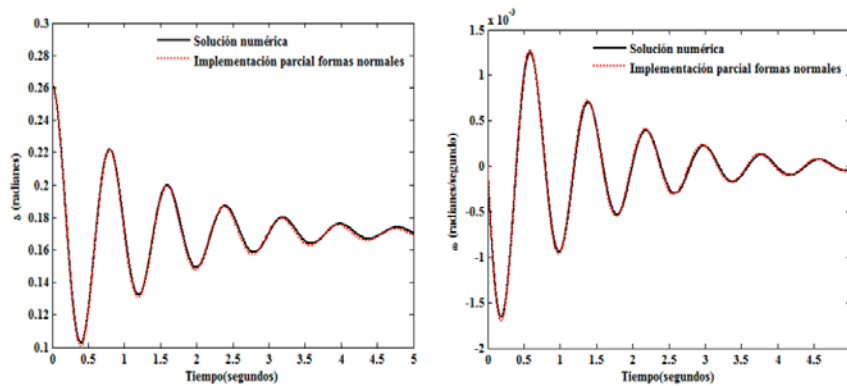


Figura 5 Posición y velocidad angular ante entrada  $P_m = 0.259u(t)p.u.$

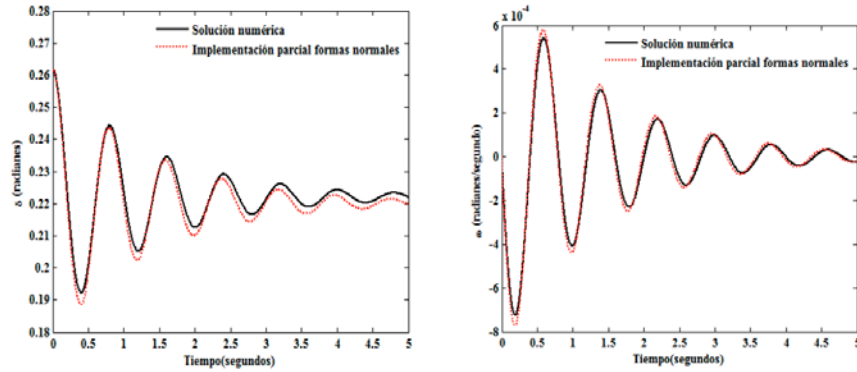


Figura 6 Posición y velocidad angular ante entrada  $P_m = 0.270u(t)p.u.$

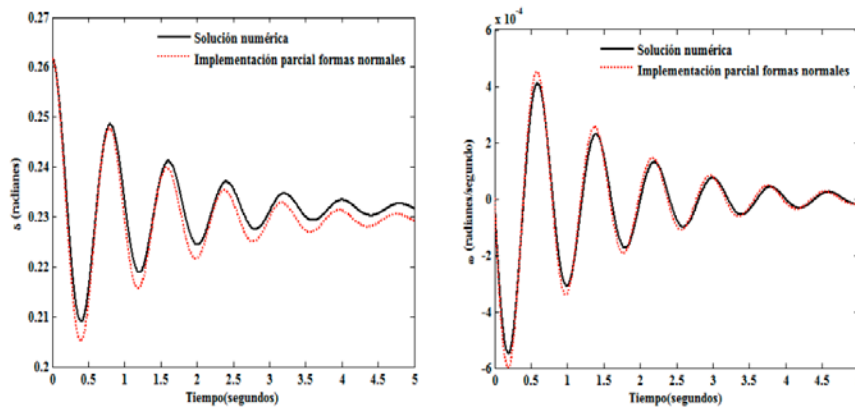


Figura 7 Respuesta de salida ante entrada  $P_m = 0.270u(t)p.u.$

Para ilustrar el efecto de los términos no lineales y la relación que mantiene la potencia mecánica con el resto del sistema, en el apéndice B, se muestran las ecuaciones en el dominio del tiempo obtenidas por el modelo propuesto.

#### 4. Discusión

Ante el crecimiento de población, la demanda del uso de energía eléctrica ha provocado el desarrollo de métodos y técnicas de análisis alternativos o complementarios a los modelos convencionales de la estabilidad de pequeña señal. La mayoría de las herramientas desarrolladas en este campo analizan el comportamiento del sistema utilizando técnicas de análisis lineal, lo que en gran medida afecta a la naturaleza del sistema ya que elimina parámetros del sistema que tienen efectos considerables en la interacción o participación con cada una de

las variables del mismo, y que no se ven afectados hasta que surgen grandes cambios o perturbaciones que afectan al sistema.

## 5. Conclusiones

En este trabajo, se propone una alternativa metodológica basada en la teoría de formas normales sobre la expansión parcial del modelo de estudio original y matemática simbólica para determinar los efectos de tercer orden en el comportamiento dinámico no lineal de un sistema de potencia, sin embargo es un procedimiento generalizado y permite eliminar las no linealidades de cualquier orden presentadas por la naturaleza del modelo de estudio.

Una de las características del método propuesto es que el grado de exactitud dependerá de la magnitud de la potencia mecánica como entrada. El análisis también sugiere que los efectos no lineales mayormente se presentan en el sistema cuando la perturbación llega a ser grande.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] I. Martinez, A. R. Messina, E. Barocio, "Higher-Order Normal Form Analysis of stressed Power Systems: A Fundamental Study". *Electric Power Components and systems*. Volume 32. No. 8. 12 December 2004. Pp. 1301 – 1317.
- [2] A. H. Nayfeh, *The Method of Normal Forms*. Second edition. 2011. John Wiley & Sons. Singapore. ISBN 9783527635771.
- [3] M. Han, P. Yu, *Normal Forms, Melnikov Functions and Bifurcations of Limit*. 1er Edition. 2012. Springer Science. New York. ISBN 9781447129189.
- [4] Irma Martínez, Carlos Juárez, "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". *Pistas educativas*. Núm. 112. Noviembre 2015. Pp. 128-143. ISSN 1465-1249.
- [5] J. Guckenheimer, P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcation of Vector Fields*. 1er edition. 1983. Springer Verlag. New York.

- [6] Yao-Nan Yu, *Electric power system dynamics*. First Edition. 1983. Academic press. New York. ISBN 0-12-774820-2.
- [7] V. I. Arnold, *Geometrical methods in the theory of ordinary differential equations*. Second Edition. 1998. Springer Verlag. New York. ISBN 3-540-96649-8.
- [8] A. H. Nayfeh, *Method of Normal Forms (Wiley Series in Nonlinear Science)*. 1<sup>st</sup> Edition. 1993. John Wiley & Sons. New York. ISBN 0-471-59354-0.
- [9] I. Martínez, A. R. Messina, E. Barocio, "Perturbation Analysis of Power systems: Effects of Second and- Third-Order Nonlinear Terms on system Dynamic Behavior". *Electric Power Systems Research*. Volume 71. Issue 2. October 2004. Pp.159-167. ISSN: 03787796.
- [10] V. F. Edneral, "A symbolic approximation of periodic solutions of the Henon-Heiles system by the normal form method". *Mathematics and Computers in Simulation*. Volume 45. Issue 5-6. March 1998. Pp. 445-463.
- [11] I. Martínez, A. R. Messina, V. Vittal, "Normal Form Analysis of Complex System Models: A Structure-Preserving Approach", *IEEE Transactions on Power Systems*. Volume 22. Issue 4. November 2007. Pp. 1908-1915. ISSN: 08858950.
- [12] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Fifth Edition. 2010. Prentice Hall. New Jersey. ISBN: 0136156738, 9780136156734.
- [13] P. Kundur, *Power System Control and Stability*. 1<sup>st</sup> Edition. 1994. McGraw-Hill. EE.UU. ISBN 0-07-035958-X.

## **7. Autores**

Dra. Irma Martínez Carrillo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y 2008 respectivamente, Ganadora de los certámenes nacionales de tesis en el área de Informática y Control a nivel Maestría y Doctorado en 2005 y 2009. Actualmente es profesora de tiempo completo en la UAEMex.

Dr. Carlos Juárez Toledo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y

2008 respectivamente, desarrollo una estancia doctoral en el departamento de Eléctrica y Computación de NU, Boston, Massachussets en 2005 y una estancia posdoctoral en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la UNAM en 2008-2009. Actualmente es profesor de tiempo completo en la UAEMex.

# IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE CONTROL EN SISTEMAS ALTAMENTE NO-LINEALES

***M. A. Gómez Martínez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***A. Pizano Martínez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***E. A. Zamora Cardenas,***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***J. M. Lozano García***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

***H. Rostro Gonzalez***

Universidad de Guanajuato.

*gomezma@ugto.mx*

## Resumen

En el presente trabajo se muestra un estudio del comportamiento dinámico del horno de arco eléctrico conectado a un sistema de potencia, con el fin de determinar las diferentes zonas de control que se presentan en su operación, utilizando la teoría de bifurcaciones. En el estudio en estado estacionario, la obtención de los valores característicos del sistema, el comportamiento de los diagramas de bifurcación y la estabilidad de los puntos de equilibrio se obtienen por medio de la utilización del programa de simulación XPPAUT 5.0 (X-Windows Phase Plane Plus Auto por sus siglas en ingles).

**Palabra(s) Clave(s):** Diagrama de bifurcación, puntos de equilibrio, zonas de operación.

## 1. Introducción

La estabilidad de los sistemas de potencia ha sido un área de estudio desde los primeros días de la generación y transmisión de potencia eléctrica. Esta se convirtió en un área de mayor interés en la medida en que los sistemas de potencia sobre grandes áreas geográficas comenzaron a ser interconectados. Como el problema creció, equipo sofisticado de control y esquemas de protección han sido agregados al sistema para ayudar a la estabilidad, como resultado, el análisis del problema de estabilidad se ha hecho más difícil.

Muchos países alrededor del mundo están enfrentando importantes cambios en el suministro eléctrico para permitir un desarrollo económico futuro. En México la capacidad instalada hasta hace algunos años le permitió un crecimiento moderado en su economía y tenía la suficiente infraestructura eléctrica para atraer inversión extranjera. Sin embargo actualmente este margen de respaldo poco a poco comienza a reducirse, lo que se verá reflejado en la sobrecarga de líneas de transmisión pudiendo llegar a un colapso de voltaje en el sistema. El problema de estabilidad del sistema tuvo su comienzo cuando dos máquinas síncronas fueron accionadas por primera vez en paralelo o en sincronismo [1]. Muy pronto se observó que la cantidad de potencia que puede ser transferida de una máquina síncrona a otra es limitada. A esta cantidad de carga se le considero como el límite de estabilidad [2]. A medida que los sistemas se desarrollaron, se encontró que con ciertas máquinas, particularmente con ciertos sistemas conectados a través de líneas de transmisión de gran reactancia, era difícil mantener el sincronismo bajo condiciones normales y el sistema tuvo que ser aislado cuando ocurrían fallas o presentaba pérdida de excitación. Varias condiciones de emergencia hicieron necesario operar máquinas y líneas a la máxima capacidad práctica de carga; bajo estas condiciones, límites de estabilidad fueron encontrados por experiencia. Subsecuentemente, fue aparente que varias de las interrupciones del servicio fueron el resultado de disturbios que causaron pérdida de sincronismo entre varias



máquinas y que, mediante la modificación de diseño, distribución u operación del sistema, era posible proveer un mejor servicio estándar. Los primeros trabajos analíticos en estabilidad de sistemas de potencia fueron dirigidos a la determinación de límites de potencia de máquinas síncronas bajo dos condiciones: salida de un motor síncrono o generador de un bus infinito; y segundo, la salida o límite de estabilidad para dos máquinas idénticas, una actuando como generador y la otra actuando como motor. Sin embargo el desarrollo principal en estabilidad de sistemas de potencia no se debió a la extensión de la teoría de las máquinas síncronas, sino del resultado del estudio de sistemas de transmisión de gran distancia.

Los estudios de estabilidad que evalúan el impacto de disturbios en el comportamiento dinámico electromecánico de los sistemas de potencia son de dos tipos: “estabilidad transitoria y estabilidad de estado estable”. Comúnmente los estudios de estabilidad transitoria los realizan los departamentos de planeación de las compañías eléctricas que son responsables de asegurar el comportamiento dinámico apropiado del sistema [3]. Los modelos del sistema usados en tales estudios son extensivos porque en la actualidad los sistemas de potencia son vastos, altamente interconectados y con cientos de máquinas que pueden interactuar a través de las redes de extra alto voltaje (300 a 800 kV) y ultra alto voltaje (arriba de 800 kV). La estabilidad transitoria es un concepto usado exclusivamente para condiciones transitorias del sistema de potencia estudiado; su investigación se enfoca en tratar de encontrar: que tipos de perturbaciones no resultan en la ruptura de sincronismo de alguna máquina del sistema. En general el comportamiento dinámico de los sistemas de potencia es descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales, las cuales describen principalmente el comportamiento dinámico de los generadores síncronos en el sistema. El estudio de la estabilidad se lleva a cabo por medio de la evaluación de la estabilidad de los puntos de equilibrio del conjunto de ecuaciones. Los resultados obtenidos son válidos solamente para un escenario particularmente analizado, cualquier cambio en los datos, en la condición de operación inicial, o en el escenario de estabilidad, requerirá de una nueva evaluación tomando en cuenta los cambios en las

ecuaciones [4,12]. De igual manera tenemos que bajos ciertas condiciones de operación del sistema pequeñas variaciones en los valores de los parámetros del mismo producen cambios cualitativos significativos en las propiedades del sistema, es decir, se producen cambios en la estabilidad original del sistema, bajo este contexto existe una opinión creciente con respecto a que la investigación de estos cambios en la estabilidad del sistema se debe de realizar por medio de la teoría de la dinámica de sistemas [5]. Diversas teorías de análisis matemático y herramientas computacionales han sido utilizadas para propósitos de estudio de estabilidad transitoria y de estado estable en sistemas de potencia, los primeros métodos usan la integración mediante fuerza bruta por medio de la linealización de un conjunto de ecuaciones dinámicas, y entonces las condiciones de estabilidad son encontradas por medio de la inspección de los valores característicos de la matriz Jacobiana [6]. El método directo de Lyapunov es una herramienta muy práctica para estudios de estabilidad transitoria, debido a su alta eficiencia tiene importantes aplicaciones en operación y diseño de sistemas de potencia [7]. El cálculo de los exponentes de Lyapunov sirve para confirmar comportamientos caóticos en un simple sistema de potencia [8], mientras que Naoto Yorino [9] utiliza un esquema pre editor-corrector para obtener puntos limite Q para estudios de flujos de potencia. La técnica de continuación de flujo de potencia se ha usado dentro del análisis de estabilidad de estado estable para encontrar la ruta de soluciones continuas de flujos de potencia comenzando en alguna carga base y guiando al límite de la estabilidad el voltaje en estado estable [10]. El método del punto de colapso (PoC) y el método de continuación fueron implementados computacionalmente por Cañizares y Alvarado [11] para estudios de grandes sistemas de potencia AC/DC.

## **2. Modelado y Caso de estudio**

Con el fin de comprobar lo anterior se diseñó un experimento, el cual se planteó de acuerdo al modelo del horno de arco eléctrico descrito en [10], el cual se modela mediante la ecuación 1 y se acopla a un sistema eléctrico; la figura 1 ilustra dicho sistema.

$$K_1 r^n + K_2 r \frac{dr}{dt} = \frac{K_3}{r^{m+2}} i^2 \quad (1)$$

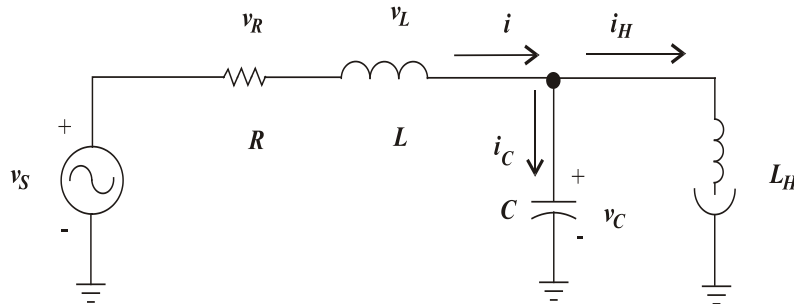


Figura 1 Sistema de estudio.

Al analizar algebraicamente el sistema de la figura 1 y aplicar las leyes de corrientes y voltajes de Kirchhoff's y el analisis nodal, se obtuvo un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento dinámico de dicho sistema, las cuales se pueden expresar mediante la ecuación 2 en espacio de estado.

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{v}_c \\ \dot{i}_H \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_H} & -\frac{K_3 r^{-(m+2)}}{L_H} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_3 r^{-(m+3)} i_H^2}{K_2} - \frac{K_1 r^{(n-1)}}{K_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v_c \\ i_H \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_S \quad (2)$$

### 3. Resultados

El modelo representado por (3) se integró a un archivo ODE, el cual sirve como inicio para utilizar el programa XPPAUTO50. Los valores que se utilizaron para realizar este experimento se muestran tabla 1. Con estos valores el sistema inicialmente presenta un estado transitorio, llegando eventualmente al estado estacionario, en el cual se mantiene asintoticamente estable, según se muestra en la figura 2, que describe el comportamiento del sistema en el tiempo.

Tabla 1 Parámetros en  $\mu$ . Para el caso estable.

Parámetros	Condiciones iniciales
$C$	0.1
$L$	0.1
$R_1$	0.1
$L_h$	0.1
$v_s$	1
$M$	2
$N$	2
$K_1$	0.08
$K_2$	0.005
$K_3$	3

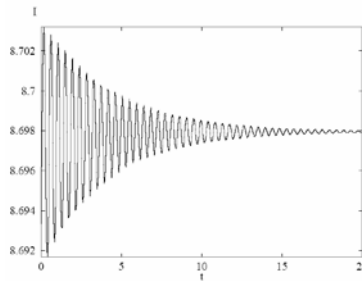


Figura 2 Respuesta en el tiempo del caso de estudio.

El sistema alcanza el estado estacionario en  $t=20$  s, con un valor de corriente  $i=8.697 \mu$ . El diagrama de bifurcación obtenido se muestra en la figura 3, el cual se logró al variar la inductancia. La línea sólida y punteada representa la trayectoria estacionaria estable e inestable, respectivamente. De la misma manera los círculos vacíos y los círculos rellenos representan orbitas periódicas inestables y estables respectivamente.

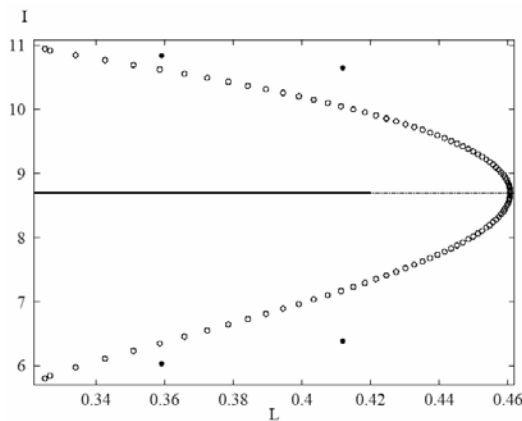


Figura 3 Diagrama de Bifurcación.

Obsérvese de la figura 3 que la inductancia es un parámetro de bifurcación, debido a que al variar este parámetro, se presenta una bifurcación tipo Hopf en el valor de  $L=0.4607 pu$ . La cual produce que el sistema tenga 2 zonas de operación; la zona 1 es una región de inestabilidad, dentro de esta zona cualquier punto de operación tiende a volver inestable el sistema y la zona 2 es una región estable, en donde cualquier punto de operación en esta región tiende a volver estable el sistema. La bifurcación Hopf se caracteriza por la aparición de orbitas periódicas de pequeña amplitud a partir de un punto de equilibrio, esto debido a la variación de un parámetro del sistema. Una bifurcación Hopf Inestable/subcritica (UHB por sus siglas en ingles) y una bifurcación Hopf Estable/supercrítica se detectaron con pequeñas variaciones del orden de  $L=0.3253pu$  y  $L=0.3252pu$ , respectivamente tal y como se muestra en la figura 4, los valores utilizados para este estudio se muestran en tabla 2.

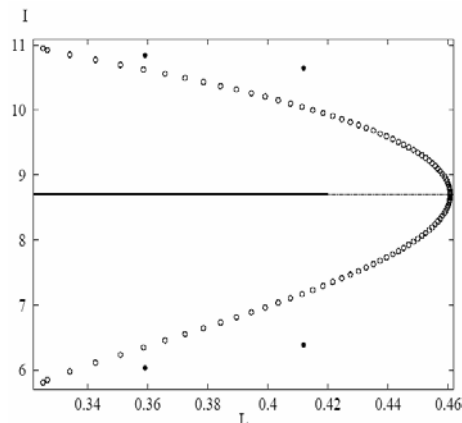


Figura 4 Bifurcación Hopf Estable e Inestable.

Tabla 2 Parámetros en  $pu$ . Para el sistema modificado.

Parámetros	Condiciones iniciales.
$C$	0.1
$L$	0.3251900570
$R_1$	0.1
$L_h$	0.1
$v_s$	1
$M$	2
$N$	2
$K_1$	0.08
$K_2$	0.005
$K_3$	3

La bifurcación Hopf presenta un comportamiento oscilatorio característico debido a la presencia de orbitas periódicas de pequeña amplitud para el punto de equilibrio, tal y como se muestra en la figura 5.

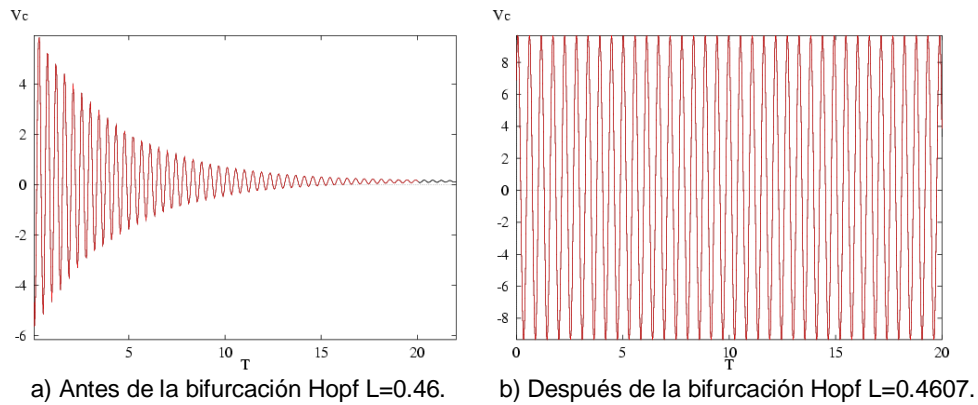


Figura 5 Magnitud de voltaje.

Para el caso de que los parámetros del sistema cambien de valor, aunque sea por una muy pequeña variación, el sistema presenta comportamientos de bifurcaciones Hopf Subcrítica ó Supercrítica, lo anterior se representa en la figura 6.

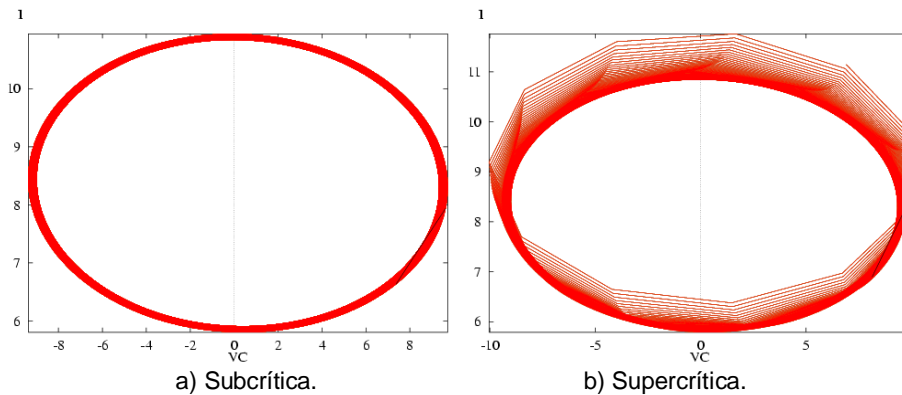


Figura 6 Comportamiento del sistema en la Bifurcación Hopf

#### 4. Conclusiones

En esta contribución se ha analizado la estabilidad de un sistema altamente no-lineal por medio de la teoría de bifurcaciones, el cual incluye un horno de arco eléctrico. El horno de arco se ha representado mediante un modelo basado en el balance de potencias. Se observó el comportamiento en el tiempo del sistema

cuando inicia su operación, posteriormente fueron variados los parámetros del sistema intencionalmente con el fin de observar su evolución y la robustez del sistema, para este caso en particular se encontró que la inductancia del SEP es un parámetro crítico del mismo, a tal grado que se pudo observar que el parámetro de bifurcación es la inductancia, la cual produce una bifurcación Hopf, que resulta en dos zonas de operación una subcrítica y otra supercrítica. Tradicionalmente se requería un gran esfuerzo computacional para encontrar estas bifurcaciones, utilizando los métodos convencionales de fuerza bruta. Sin embargo la aplicación de la teoría de bifurcaciones reduce significativamente este esfuerzo. Se ha demostrado que el sistema es sensible a cualquier variación en el parámetro de bifurcación, inclusive del orden de milésimas, lo cual puede llevar al sistema de tener una órbita oscilatoria estable, a estar en un estado asintóticamente inestable o asintóticamente estable, esto es una condición no deseable del sistema dado que produce daños en el mismo, los cuales pueden ser de consecuencias severas. El estudio da la oportunidad de identificar zonas de operación del sistema y de esta manera poder determinar valores críticos del mismo para los cuales se pierde la estabilidad bajo ciertas condiciones iniciales.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] CIGRE Working Group 36-05, "Harmonics, characteristic parameters. Methods of Study, Estimates of existing values in the Network". *Electra*. No. 77. 1981. Pp.35-54.
- [2] E. Acha, A. Semlyen, N. Rajakovick, "A harmonic domain computational package for nonlinear problems and its Applications to Electric Arcs". *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 5. No. 3. Julio 1990. Pp. 1390-1397.
- [3] Douglas, M. T. Bishop, J. F. Witte, "Harmonic Measurement, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility". *IEEE Transaction on Power Delivery*. Vol. IA-32. No. 3. Mayo/junio. 1996. Pp. 617-624.

- [4] R. C. Dungan, "Simulation of Arc Furnace Power Systems ". IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-16. No. 6. Noviembre/Diciembre 1980. P.p. 813-818.
- [5] M. D. Cox, A. Mirbod "A New Static VAR Compensator for an Arc Furnace". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol. PWRS-1. No. 3. Agosto 1986. Pp. 110-120.
- [6] E. O'Neill Carrillo, G. T. Heydt, E. J. Kostelich, S. S. Venkata, A. Sundaram, "Nonlinear Deterministic Modeling of Highly Varying Loads", IEEE PES 98 SM 174.
- [7] S. Varadan, E. B. Makram, A. A. Girgis, "A New Time Domain Voltaje Source Model For an Arc Furnace Using EMTP". IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11. No. 3. Julio 1996. P.p. 1685-1690.
- [8] J. G. Mayordomo, L. F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, L. Zabala, J. Amantegui, "A New Frequency Domain Arc Furnace Model fro iterative Harmonic Analysis". IEEE Transaction on Power Delivery. Vol 12. No. 4. Octubre 1997. P.p. 1771-1778.
- [9] G. C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli "Arc Furnace Model For the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks". IEEE transaction on Power Delivery. Vol 9. No. 4. Octubre 1994. P.p. 2026-2036.
- [10] Medina, N. Garcia. "Newton Methods for the Fast Computation Of the Periodics Steady State Solutions Of Systems with Nonlinear and Time-varying Components". Conference Proceedings of the IEEE PES Summer Meeting, Edmonton, Alberta, CANADA. Vol 2. Julio 18-22 1999. Pp. 664-669.
- [11] H. S. Strogatz, "Nonlinear dynamics and chaos", Cambridge Massachusetts. perseus publishing 2000.
- [12] Samet, H. Farjah, E. Sharifi Z. "A dynamic, nonlinear and time-varying model for electric arc furnace". International Transaction on Electrical Energy Systems. Vol 3. No. 5. Agosto 2015. Pp. 895-903.



# **TABLERO DIDÁCTICO PARA PRÁCTICAS CON CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMABLES**

## ***Miguel Magos Rivera***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

## ***José Antonio Lara Chávez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*jalch@correo.azc.uam.mx*

## ***Ruth Mireya Ramírez Zúñiga***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

## ***David Alberto Farfán Espinoza***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

## ***Miguel Ángel Figueroa Sánchez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

## ***Zabdiel Eliud Gutiérrez Flores***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Una capacitación adecuada en la programación de Controladores Lógicos Programables (PLCs) implica contar con equipos didácticos que permitan simular procesos industriales. La versatilidad que tengan estos simuladores permitirá ejemplificar la mayor parte de las funciones que los controladores poseen. En este trabajo se describe el diseño y construcción de un tablero didáctico basado en el PLC S7-226 de Siemens. El equipo construido cuenta con 16 interruptores que

permiten simular el estado de sensores e igual número de indicadores luminosos que pueden ser empleados para señalar el estado de las salidas de control. Se incluyeron en el equipo un módulo de entradas y salidas analógicas, un visualizador de textos y un adaptador Ethernet, elementos que permiten un manejo más profundo de las funciones del PLC. Para visualizar la utilidad del sistema, el artículo incluye una serie de ejemplos que pueden ser implementados, mismos que involucran, comunicación con otros controladores, así como con sistemas de Interface Hombre Máquina (HMI).

**Palabra(s) Clave(s):** Automatización de procesos, equipos de laboratorio, PLCs.

## 1. Introducción

El alto crecimiento de la tecnología implicada en el desarrollo del control de procesos ha ocasionado que las tareas producción sean desarrolladas en base a sistemas de automatización. Para lo cual en muchas ocasiones es necesario de un estudio previo, donde se desarrollen prototipos previos a la construcción de un sistema real [8]. Lo anterior buscando entre otras cosas, mejores productos a bajo costo que sean capaces de lograr una alta eficiencia y calidad de producción. Lo anterior es posible monitoreando continuamente los principales parámetros de interés en el proceso, como lo son las temperaturas, presiones, niveles, flujos, concentraciones, etc. Esta información puede ser empleada para que el proceso se realice de manera automática, encendiendo válvulas, bombas, calentadores, motores, relevadores, etc. [1]. Lo anterior realizado en un laboratorio de docencia, permite a los estudiantes ampliar la experiencia en el diseño, construcción y monitoreo de equipos, que les brinden los conocimientos básicos en su vida profesional [5]

El Controlador Lógico Programable PLC por sus siglas en inglés, es el dispositivo más utilizado actualmente para el control de procesos productivos. Lo anterior debido a que este es capaz de controlar de manera simple distintos equipos y maquinaria involucrados en un proceso automático [6]. Este dispositivo cuenta con módulos de entradas y salidas digitales para realizar dichas acciones, además de que es posible agregarle módulos de entradas analógicas. De manera similar,

estos equipos pueden ser complementados con módulos de comunicación lo cual amplía sus opciones de conectividad con otros equipos [3]. Por otro lado es posible conectar a estos dispositivos interfaces gráficas con la intención de que el operador pueda interactuar directamente con el PLC. Pueden tratarse desde un visualizador de textos con teclado hasta pantallas táctiles, que permiten a los usuarios controlar y monitorear sistemas [7]. Este tipo de interfaces son muy ampliamente utilizadas en la industria y se comunican con el PLC utilizando protocolos previamente establecidos por el fabricante [2]. La importancia del manejo de estos dispositivos ha generado que se desarrollen laboratorios utilizando un PLC como base [9]. Lo antes descrito da como resultado que el correcto manejo del PLC sea uno de los principales objetivos en estudio del control de procesos automatizados.

Algunos autores sugieren que la metodología de estudio se encuentra cada vez más orientada a enfrentar al estudiante a problemáticas más cercanas a la realidad que hagan que estos se adapten cada vez mejor a la dinámica de cambios tecnológicos actuales [4]. Debido a lo anterior, diversas instituciones en el mundo han optado por la elaboración de laboratorios remotos, donde es posible realizar experimentos a distancia, evitando que el alumno se exponga a situaciones peligrosas y al mismo tiempo se proporcione la orientación necesaria [10]. De manera similar los laboratorios virtuales ofrecen condiciones similares a los remotos, con las ventajas de que estos se basan totalmente en software lo que implica: realidad aumentada, dinámica computacional, mundos virtuales, etc. [11]. Por otro lado, la constante búsqueda de optimizar recursos ha generado la construcción de prototipos utilizando componentes a bajo costo, que cada vez son las eficientes y confiables [12]. Por tal motivo el trabajo en los laboratorios resulta ser una parte fundamental en el desarrollo académico del estudiante de ingeniería, sin olvidar que este trabajo es tan solo un respaldo para hacer comprensibles los conceptos teóricos [13].

Debido a los altos costos para equipar los laboratorios, en la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco desde hace ya algunos años se ha optado por el auto equipamiento. Esto ha permitido a la institución reducir los

costos ocasionados por tal medida y que además se haya incrementado la experiencia en el desarrollo de equipos didácticos [16] [17] [14] [15].

En este trabajo presenta el diseño y construcción de un tablero didáctico basado en el PLC S7-226 de Siemens. El cual podrá ser utilizado para realizar prácticas de laboratorio que involucren el empleo de un controlador lógico programable. La segunda sección de este documento expone las características principales del equipo didáctico construido, por otra parte la tercera sección presenta el diseño y construcción del mismo. La cuarta sección presenta algunos ejemplos prácticos elaborados con el equipo. Mientras que en la última sección se muestran los resultados y conclusiones del trabajo elaborado.

## 2. Características Generales del Equipo

Como se mencionó en la primera sección de este documento el equipo construido está basado en el PLC S7-226 de Siemens. Además se agregó un módulo de salidas analógicas modelo EM235. De igual forma se utilizó un módulo de comunicación Ethernet modelo CP243-1 y un visualizador de textos con interface para el operador modelo TD200.

El diseño del equipo se realizó de tal manera que las distintas señales de entradas y salidas digitales, actuadores y botones estén disponibles en bornes de conexión. De tal manera que el usuario es capaz de proponer distintas configuraciones de operación del equipo de una manera simple y rápida, ver figura 1.



Figura 1 Tablero didáctico para practicas con PLC'S.

Todos los elementos que conforman el equipo han sido colocados sobre un gabinete metálico. En la parte frontal se adecuaron 16 botones momentáneos, 16 interruptores y 16 indicadores luminosos, además de tener en esta parte el visualizador de textos TD200.

En el costado derecho del gabinete se tienen los bornes de conexión tipo banana en los cuales se conectarán las entradas digitales al controlador, y otros más donde estarán disponibles las salidas del mismo. Se tiene aquí mismo el interruptor general del aparato.

El lado izquierdo del tablero cuenta con un conector de corriente alterna de 127 volts, además de un conector Jack Ethernet por medio del cual se realiza la comunicación con otros dispositivos.

### **3. Diseño y Construcción**

Con la intención de facilitar la explicación acerca del diseño y construcción del equipo, este se dividió en tres bloques fundamentales: Puerta, gabinete e interior. Los cuales se exponen a continuación.

#### **Puerta**

Como se mencionó anteriormente, el equipo construido fue elaborado utilizando un gabinete metálico. Este cuenta en su parte frontal con una puerta donde se adecuó el equipo y componentes necesarios, en esta se tienen 16 botones circulares momentáneos de 18mm de diámetro, con los cuales el usuario es capaz de iniciar, pausar o continuar la secuencia de control de un proceso. Igualmente se cuenta con 16 interruptores de tipo balancín de 12mm de radio, a través de los cuales se puede simular la señal proveniente de un sensor. De manera similar se colocaron 16 indicadores luminosos que utilizan 24 volts de corriente directa para operar, con los que se podrá indicar estados o etapas en una secuencia de control. Además se incorporó un visualizador de textos con interface modelo TD200. Se trata de una pantalla de cristal líquido de 2 renglones de 20 caracteres cada uno. Con este elemento se aumenta el número de botones momentáneos a utilizar por el usuario, debido a las 4 teclas configurables que el dispositivo posee.

Las ventajas de utilizar este dispositivo se centran en la posibilidad de monitorear e interactuar con el estado de un determinado proceso en forma simple. La figura 2 muestra la vista frontal del tablero con los elementos adecuados a la puerta.



Figura 2. Vista frontal del tablero didáctico.

El diagrama de conexiones de los elementos en la puerta se muestra en la figura 3.

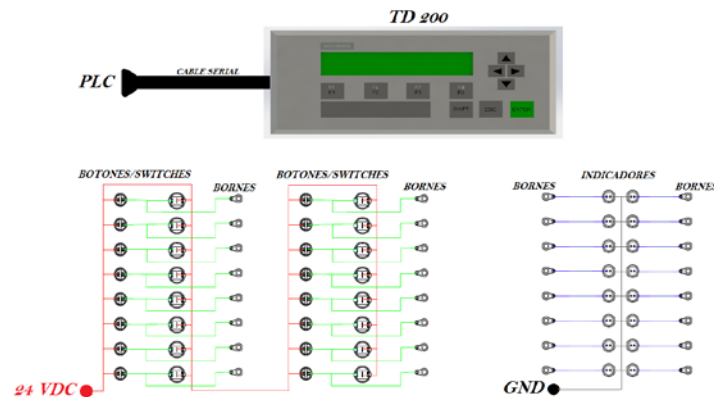


Figura 3 Diagrama de conexiones en puerta.

## Gabinete

En el costado derecho del gabinete se encuentran los bornes de conexión tipo banana en donde están disponibles las señales de salida del controlador y donde se conectarán las señales de entrada al mismo. Estos bornes utilizan un nivel de voltaje de 24 volts para señales digitales y un rango de 0 a 10 volts para señales analógicas. Por último fue colocado un interruptor de tipo balancín de 22mm, el

cual tiene la función de encender el sistema. Una vista del costado derecho del equipo se muestra en la figura 4.



Figura 4 Vista lateral derecha del tablero didáctico.

La figura 5 muestra el diagrama de conexiones de los elementos colocados en el costado derecho del tablero didáctico.

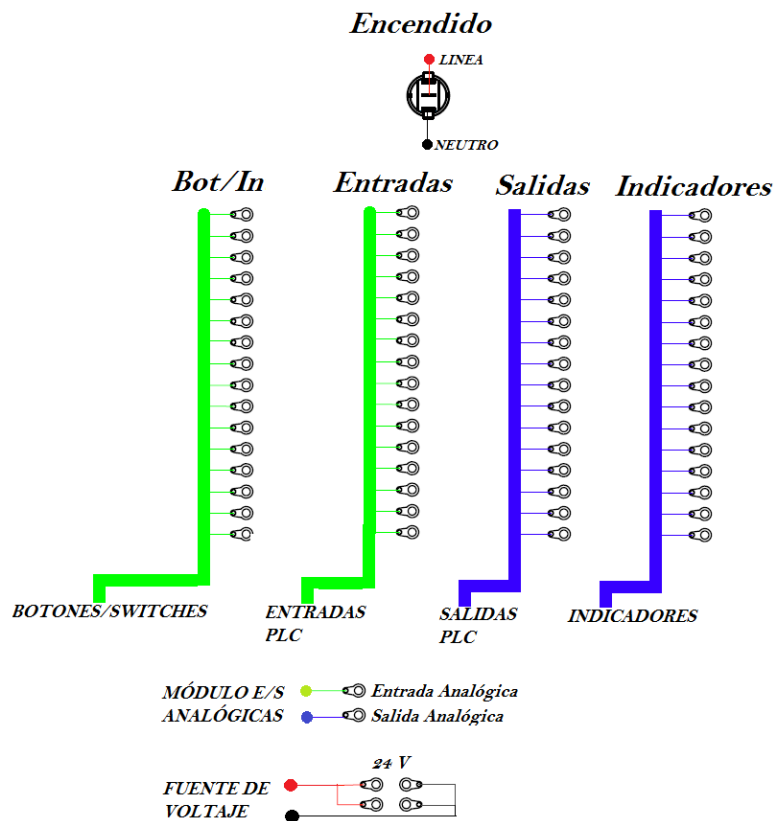


Figura 5 Diagrama de conexiones costado derecho.

Por otro lado en el costado izquierdo del equipo se cuenta con un conector de corriente alterna de 127 volts modelo IEC-C14 que alimenta a todo el sistema. De igual forma se tiene un conector Jack Ethernet categoría 5e, por medio del cual se realiza la comunicación con equipos externos. Una vista de este costado del gabinete se muestra en la figura 6.



Figura 6 Vista lateral Izquierda del tablero didáctico.

## **Interior**

Al interior del tablero se encuentra una pastilla termo magnética a donde llega la señal de voltaje de AC, la cual ofrece protección a todos los elementos del equipo en caso de una conexión errónea. Además se tiene, como ya anteriormente se había mencionado, un PLC de Siemens modelo S7-226, un módulo de entradas y salidas analógicas modelo EM235 y un módulo comunicación Ethernet modelo CP234-1. El PLC cuenta con 24 entradas y 16 salidas digitales, mientras que el módulo de E/S cuenta con tres entradas y una salida, todas análogas.

Del PLC se utilizaron todas las salidas y solo 16 de las entradas mientras que del módulo de E/S analógicas se utilizó una salida y una entrada. El módulo Ethernet solo cuenta con su conector de comunicaciones Jack Ethernet. Finalmente para alimentar las entradas y salidas del PLC y los módulos adicionales, se tiene una fuente de 24 volts de corriente directa que proporciona hasta 2.5 amperes, corriente que resulta suficiente para el correcto funcionamiento de los equipos.

Los elementos al interior del tablero se encuentran montados sobre una placa de acero de 350mm de ancho por 466mm de largo, utilizando Riel DIN de 26 cm de



longitud. De igual forma y para completar las conexiones entre los equipos en el interior con los elementos en puerta y costados, se utilizaron clemas de conexiones de 5mm de paso. Además se utilizó canaleta plástica de 40mm de ancho por 25mm de alto para la correcta organización de los cables. En la figura 7 se muestra el interior del tablero.

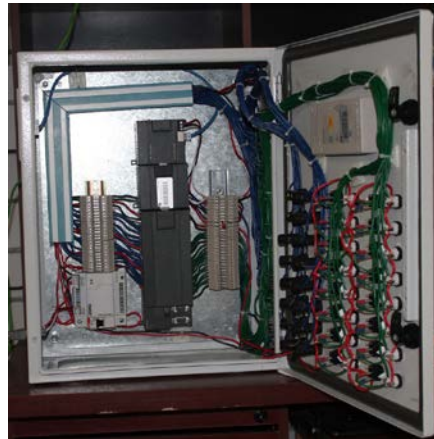


Figura 7 Interior del tablero didáctico.

La figura 8 muestra el diagrama de conexiones al interior del tablero.

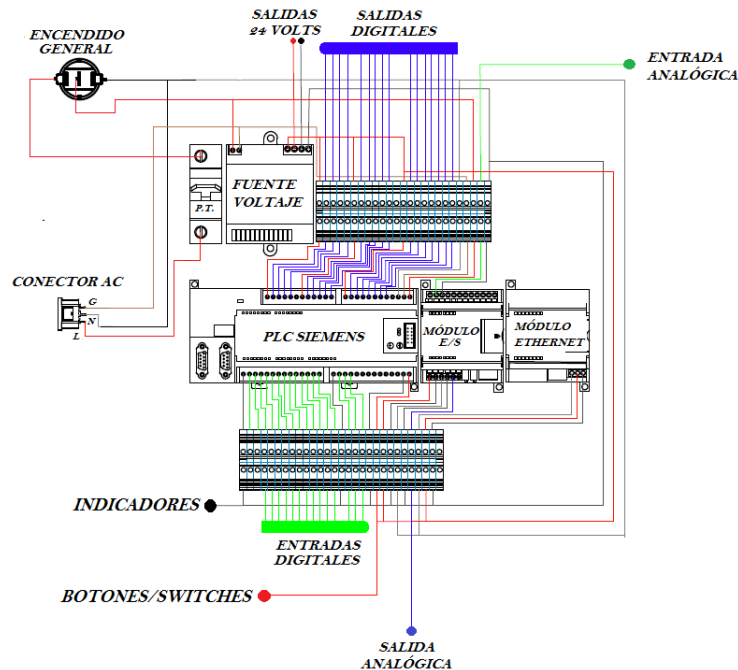


Figura 8 Diagrama de conexiones interior.

#### **4. Ejemplos Prácticos**

El objetivo de visualizar los alcances que se pueden lograr con el equipo construido, en las siguientes secciones se muestran un conjunto de ejercicios propuestos. Todos ellos basados en el control de una lavadora de piezas mecánicas con las siguientes características:

La máquina consiste de una cámara en la cual se colocan, manualmente, las piezas a lavar. 3 válvulas electromecánicas permiten el llenado y vaciado de la máquina. Una primera válvula permite alimentar con agua a la máquina, esto con el fin de realizar un prelavado y posteriormente el enjuagado de las piezas. Una segunda válvula permite el paso de un producto desengrasante con el cual se realiza el lavado de las piezas. Una tercera válvula permite el vaciado de los líquidos de la máquina.

Se tiene además una bomba de recirculación que permite crear una corriente de agitación al interior de la cámara. Una resistencia, colocada al interior de la máquina, es utilizada para calentar el agua durante el prelavado de las piezas facilitando la eliminación de grasa en las piezas. Finalmente un ventilador permite inyectar aire caliente al interior de la cámara a fin de secar las piezas.

La secuencia completa, con duración de 330 segundos, está formada por 4 etapas: Prelavado, Lavado, Enjuague y Secado.

**Prelavado.** Duración: 100 segundos.

Una vez accionado el botón de arranque, una válvula permite, durante 40 segundos, el paso de agua hacia la máquina. Cuando el nivel dentro de esta se encuentra a la mitad, la resistencia calefactora se enciende durante 40 segundos.

Al encontrarse el nivel de agua dentro de la cámara al 75% de su capacidad, la bomba de agitación se enciende 40 segundos. Una vez que estas acciones han concluido, la válvula de vaciado permite desalojar el agua del interior de la máquina para lo cual debe permanecer abierta 30 segundos.

**Lavado.** Duración: 80 segundos.

Esta etapa inicia inmediatamente después de que el agua de prelavado ha sido evacuada. La primera acción es permitir el paso del desengrasante durante 30 segundos. Una vez que el nivel de desengrasante dentro de la máquina llega a

66% de su capacidad, la bomba de agitación se enciende por 30 segundos. Transcurrido este tiempo, se procede a vaciar la máquina abriendo la válvula correspondiente durante 30 segundos.

Enjuague. Duración: 100 segundos.

Esta etapa inicia inmediatamente después que el desengrasante ha sido evacuado. Durante 40 segundos se permite el paso de agua. Al encontrarse el nivel de agua dentro de la cámara al 75% de su capacidad la bomba de agitación se enciende 40 segundos. El vaciado se obtiene con la apertura de la válvula correspondiente, durante 30 segundos.

Secado. Duración: 50 segundos.

La última etapa consiste en encender el ventilador durante 50 segundos.

### Control de lavado con interfaz gráfica en INTOUCH

El ejemplo consiste en realizar el sistema de control de lavado con su respectiva interface HMI en el paquete INTOUCH. Esta simula la operación de los distintos elementos de la máquina, con lo cual el usuario es capaz de interactuar con el proceso en tiempo real.

El objetivo principal de esta aplicación está orientado a la utilización de los diferentes componentes y dispositivos incorporados al tablero didáctico. Para poder conectar este con InTouch se utilizó el OPC "TOP SERVER", el cual toma los datos del PLC y los envía a una memoria física de la computadora, ver figura 9. Es importante mencionar que en todo momento la comunicación entre dispositivos se realiza mediante una red Ethernet.



Figura 7 Intercambio de información utilizando TOP SERVER.

En InTouch se elaboraron tres pantallas donde del operador puede monitorear el estado del proceso verificando de forma gráfica el encendido de las variables relacionadas con el proceso. El usuario es capaz de pausar, continuar o cancelar el ciclo de lavado sabiendo en qué etapa se encuentra este. Las pantallas se pueden observar en la figura 10.



Figura 8 Pantallas de control en InTouch.

### Control de Lavado utilizando, módulo de E/S analógicas y Pantalla alfanumérica TD-200

El ejemplo consiste en realizar un programa de control que simule la operación de los distintos elementos en la lavadora utilizando indicadores luminosos, además de la TD200 como interfaz para monitorear el proceso. La temperatura se registra a través de una señal analógica proveniente de un controlador de temperatura didáctico, la cual es recibida por el módulo de E/S analógicas EM235 incorporado en el tablero, figura 11.

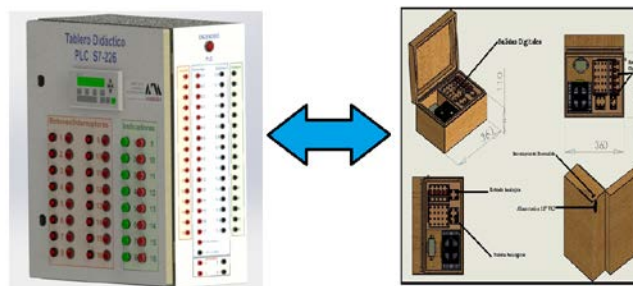


Figura 9 Control de lavado utilizando control de temperatura Didáctico.

La señal recibida por el tablero didáctico proveniente del controlador de temperatura varia de 0.5 a 2.5 volts lo que equivale a un rango de temperatura de 0 a 150 °C. Por otro lado, el tablero debe enviar una señal de 0 a 1 volts que determina la temperatura en la lavadora una vez que el calefactor se encuentre encendido. En la pantalla alfanumérica se puede observar la temperatura del proceso, además de poder pausar, continuar o cancelar el ciclo de lavado en todo momento. En la figura 12 se observa al sistema en operación.



Figura 10 Control de lavado con monitoreo de temperatura.

### Control de Lavado utilizando TD200 y Red Lion

Este ejemplo consiste en desarrollar un sistema de control que simule la operación de los distintos elementos de la lavadora utilizando indicadores luminosos y la pantalla alfanumérica para monitorear la etapa de lavado y la temperatura del proceso. La temperatura se registra con un controlador de temperatura comercial marca: Red Lion que a su vez envía este valor al PLC que se encuentra al interior del tablero didáctico. Esta comunicación se realiza mediante una red RS485 utilizando el protocolo proporcionado por el control de temperatura. Tal y como se muestra en la figura 13.

Por medio de la pantalla alfanumérica TD200 el usuario puede conocer la temperatura y estado del proceso, además de pausar, continuar o cancelar el ciclo de lavado en todo momento. Tal y como se puede observar en la figura 14.



Figura 11 Control de lavado utilizando control de temperatura Comercial.



Figura 12 Control de lavado con monitoreo de temperatura mediante red 485.

## 5. Comentarios y Conclusiones

En el presente trabajo se expuso el diseño y la construcción de un equipo didáctico de apoyo para prácticas de control e instrumentación empleando Controladores Lógicos Programables. El sistema está basado en el PLC de Siemens modelo S7-226, y se trata de una versión modificada de otros equipos que durante varios años han sido ocupados en los laboratorios de electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Durante el tiempo con el que se ha trabajado con estos equipos, surgieron problemas técnicos de capacidad y ergonomía, los cuales se tomaron en cuenta para el diseño y construcción de esta nueva versión (M. Magos 2015).

Por otro lado las mejoras de esta nueva versión, han abierto la posibilidad de aumentar el número de asignaturas a las cuales este sistema podría servir de apoyo, se pueden mencionar entre otras: Controladores Lógicos Programables, Interfaces Hombre Maquina (HMI's), Automatización Industrial y Comunicaciones Industriales.

La operación del equipo hasta el momento ha sido satisfactoria, lo que permitió iniciar el diseño y construcción de un sistema similar, basado en la familia de Controladores Lógicos Programables S7-1200 de la empresa Siemens. Los cuales al poseer una tecnología actualizada permitirán a los alumnos trabajar con equipos con poco tiempo en el mercado, ofreciéndoles la posibilidad de integrarse de mejor manera a su vida profesional.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] R. Bayindir, Y. Cetincevizb, "A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants—An experimental setup", *ISA Transactions*, Volume 50, Issue 2, April 2011, Pages 321–328.
- [2] I. Coskun, M. Fatih lúıkb, "Design and application of the technical training set for plc- based power supply unit developed for industrial applications", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 1, Issue 1, 2009, Pages 1658-1662.
- [3] E. R. Alphonsus, M. O. Abdullah, "A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 60, July 2016, Pages 1185–1205.
- [4] L. R. Vega González, "La educación en ingeniería en el contexto global: propuesta para la formación de ingenieros en el primer cuarto del Siglo XXI", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Volumen 14, Numero 2, abril-junio 2013, paginas 177–190.
- [5] R. Aldeyturriaga, C. Junior, A. Silveira, A. Coelho, "Low Cost Setup to Support PID Ideas in Control Engineering Education" *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 46, Issue 17, 2013, Pages 19-24.



- [6] J. Peixoto, J. Souza, B. Reis, C. Pereira, "MAS and PLC: a comparison on applications of manufacturing systems", *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 47, Issue 3, 2014, Pages 2600–2604.
- [7] A. Priyadharson, R. Ganesan, P. Surarapu, "PLC – HMI Automation Based Cascaded Fuzzy PID for Efficient Energy Management and Storage in Real Time Performance of a Hydro Electric Pumped Storage Power Plant", *Procedia Technology*, Volume 21, 2015, Pages 248-255.
- [8] J. Figueiredo, M. Ayala Botto, "Automatic Control Strategies Implemented on a Water Canal Prototype", *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 38, Issue 1, 2005, Pages 22–27.
- [9] Xiaomei Chen, Hongyi Gao, "A Remote PLC Laboratory Design and Realization", *Procedia Engineering*, Volume 31, 2012, Pages 1168-1172.
- [10] Alessandro Beghi, Andrea Cervato, Mirco Rampazzo, "A Remote Refrigeration Laboratory for Control Engineering Education", *IFAC-PapersOnLine*, Volume 48, Issue 29, 2015, Pages 25-30.
- [11] Veljko Potkonjak, Michael Gardner, Victor Callaghan, Pasi Mattila, Christian Guetl, Vladimir M. Petrović, Kosta Jovanović, "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review", *Computers & Education*, Volume 95, April 2016, Pages 309–327.
- [12] A. Gómez Espinosa, P.D. Lafuente Ramón, C. Rebollar Huerta, M.A. Hernández Maldonado, E.H. Olguín Callejas, H. Jiménez Hernández, E.A. Rivas Araiza, J. Rodríguez Reséndiz, "Design and Construction of a Didactic 3-DOF Parallel Links Robot Station with a 1-DOF Gripper", *Journal of Applied Research and Technology*, Volume 12, Issue 3, June 2014, Pages 435–443.
- [13] Serna M. Edgar, Polo José Antonio, "Lógica y abstracción en la formación de ingenieros: una relación necesaria", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Volumen 15, Numero 2, Abril–Junio 2014, Páginas 299–310.
- [14] M. Magos Rivera, R. Godínez Bravo, "Diseño y Construcción de un Tablero Didáctico de Neumática para la Capacitación en Automatización Industrial",



Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, San Pablo 180 Col. Reynosa Tamaulipas Azcapotzalco México D.F. México, 2015.

- [15] M. Magos Rivera, R. Godínez Bravo, D. A. Mendieta Hernández, “Equipo Didáctico para Control y Monitoreo de Temperatura”, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, San Pablo 180 Col. Reynosa. México D.F. México, 2012.
- [16] I. Siller, R. Alcántara, J. Jaimes, I. Ramírez, N. Nájera, “An Educational Level Control System”. WSEAS/IASME International Conference on Educational Technologies, Bucharest, Romania, 2006.
- [17] R. Alcántara, R. Barrales, “Integración de Labview a un prototipo didáctico para la enseñanza de la medición de parámetros propios de la industria de procesos”, Reunión de Verano IEEE, Acapulco, México, 2006.

## **7. Autores**

Ing. José Antonio Lara Chávez. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana y actualmente es ayudante del Departamento de Electrónica de la misma Institución.

Dr. Miguel Magos Rivera. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro y Doctor en Control Automático por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia). Actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Ing. Ruth Mireya Ramírez Zúñiga. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana.

Ing. David Alberto Farfán Espinoza. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana.

Miguel Ángel Figueroa Sánchez, Es estudiante de onceavo trimestre de la licenciatura en Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Zabdiel Eliud Gutiérrez Flores. Es estudiante de onceavo trimestre de la licenciatura en Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana.

# SINCRONIZACIÓN DE OSCILADORES CAÓTICOS POR ACOPLAMIENTO A MODELOS EN REDES DE TOPOLOGÍA ESTRELLA

***Didier López Mancilla***

Universidad de Guadalajara  
*dlopez@culagos.udg.mx*

***Gerardo López Cahuich***

Universidad de Guadalajara  
*dlopez@culagos.udg.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la sincronización de redes de osciladores caóticos usando acoplamiento a modelos. En particular, en este trabajo se limita el tipo de redes topología estrella. Acoplamiento a modelos es una técnica tomada de la teoría de control no lineal y es adaptada para sincronizar no solo parejas de sistemas complejos, sino redes en topología estrella. Los nodos de las redes de sistemas complejos están propuestos como sistemas caóticos, lo que permite tener sistemas verdaderamente complejos y la propuesta aporta a la problemática de sincronización de redes aplicada a las comunicaciones seguras.

**Palabra(s) Clave(s):** Acoplamiento a modelos, control no lineal, sincronización de redes.

## **1. Introducción**

En la actualidad el término sincronía, o sincronización, es ampliamente usado tanto en el lenguaje común como también en diversas áreas del conocimiento y las ciencias, refiriéndose de forma general al fenómeno mediante el cual dos o más elementos suceden al mismo tiempo, de manera pareja y equilibrada, simultáneamente.

El término sincronía proviene del griego  $\sigma\upsilon\nu$  (*sýn*), que significa juntos o en conjunto y  $\chi\rho\acute{o}\nu\omicron\varsigma$  (*chrónos*), que significa tiempo, por lo cual puede ser entendido como algo que sucede al mismo tiempo. La sincronía nos habla de una situación en la cual dos personas o dos elementos actúan de manera conjunta y pareja.

La sincronía, dice Strogatz, aparece en los lugares más inverosímiles: de las órbitas de los satélites a los electrones, el zumbido de los grillos, la tendencia en mujeres que viven cerca o que pasan mucho tiempo juntas a menstruar aproximadamente al mismo tiempo, etc. El orden está por todas partes y los científicos de diversas disciplinas están descubriendo constantemente nuevos ejemplos de ello. Pero Strogatz y sus colegas afirman algo mucho más extraordinario: "El orden no es sólo posible, es inevitable" [1].

Antagónicamente, se dice que el caos es un fenómeno inusual, que es irregular y desordenado. El caos comúnmente se asocia a una forma de ruido (un comportamiento indeseable), sin embargo no lo es, ya que es determinístico. Así, una señal caótica es una forma intermedia entre una señal periódica y una señal estocástica (ruido), y éste carácter intrínseco es el que dota de un gran interés de estudio y ofrece una amplia gama de aplicaciones, como por ejemplo, en comunicaciones seguras.

La primera evidencia aceptada del caos físico, fue descubierta por Edward Lorenz en 1963, cuando notó que un conjunto de tres ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, acopladas entre sí, pueden generar trayectorias caóticas [2]. El comportamiento caótico observado en el tiempo no se debió a fuentes externas de ruido (no las hay en las ecuaciones de Lorenz), ni a un número de grados de libertad infinito (en el atractor de Lorenz solo hay tres grados de libertad), ni a la incertidumbre asociada con mecánica cuántica (el sistema considerado es asociado a la mecánica clásica). La fuente de la irregularidad es la propiedad de ese atractor no lineal, de separar trayectorias inicialmente cercanas, exponencialmente rápido en una región acotada del espacio de fase. Lorenz llamo a esta sensible dependencia en las condiciones iniciales el *efecto mariposa*.

Hoy en día son ya numerosas las aplicaciones de la sincronización de sistemas caóticos en distintas ramas de la ciencia como por ejemplo comunicaciones

seguras con esquemas teóricos o experimentales [3-6], en el estudio de fenómenos de sistemas vivos como el Parkinson [7], encefalogramas en personas epilépticas [8], para medir actividades cardíacas [9], en los estudios de población cambiante en colonias de animales o en la propagación de epidemias [10], etc .

Como se ve en las referencias anteriores, los experimentos con sistemas que operan en régimen caótico, han obtenido, particularmente, un nuevo impulso en la década de los 90, a partir de los trabajos de Pecora y Carroll [11]. Trabajos recientes en sincronización apoyan la idea de que es realmente un tema muy actual [12-16].

Sincronizar sistemas con dinámicas complejas como los sistemas caóticos, es decir, hacer que coincidan en tiempo y forma con alguna dinámica de interés ha generado diversas líneas de investigación, principalmente por el gran potencial de aplicaciones que tiene en el área de comunicaciones seguras, así como en el desarrollo de la teoría del caos.

Los osciladores caóticos pueden ser una herramienta de gran utilidad para estudiar una gran variedad de procesos, actuando como complemento entre el experimento en sí y la simulación numérica por computadora. Entre las ventajas que ofrece la simulación se encuentran tanto el alto grado de desarrollo de componentes electrónicos como el bajo coste (en general) de dispositivos.

Como se mencionó anteriormente, son ya muchos los trabajos que han contribuido al estudio de la sincronización de los sistemas caóticos usando control, tanto acoplamiento de sistemas idénticos [17], así como no idénticos [18]. Sin embargo la mayoría de estos trabajos no contemplan que tal vez no todos los estados del sistema estén disponibles para modelar la ley de control.

De lo anterior, es que surge una de las principales motivaciones del presente trabajo por estudiar la sincronización de osciladores caóticos, tanto continuos como discretos con la intención de contribuir a la solución de este problema, empleando como metodología de trabajo, herramientas matemáticas conocidas y tomadas de la teoría de control no lineal, como son el acoplamiento a modelos y observadores, las cuales, presenta algunas ventajas con relación a otras metodologías de sincronización.

## 2. Desarrollo de la propuesta

Considere el sistema caótico de Chen, dado por el conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas 1, 2 y 3.

$$\dot{x}_1 = \theta_1(x_2 - x_1) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = x_1x_2 - \theta_3x_3 \quad (3)$$

Con parámetros:

$$\theta_1 = 35, \quad \theta_2 = 28, \quad \theta_3 = 3 \quad (4)$$

Las ecuaciones del oscilador se pueden reescribir añadiendo una entrada de control  $u(t)$ , de tal forma que el grado relativo del sistema sea  $r = 3$  como se muestra en la ecuación 2 y 3.

Sea el oscilador  $P$  la planta, y  $M$  el modelo, cuyos parámetros son idénticos, ecuaciones 5 y 6.

$$P \begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2 \\ x_1x_2 - \theta_3x_3 \\ y = x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (5)$$

$$M \begin{cases} \dot{x}_{M1} \\ \dot{x}_{M2} \\ \dot{x}_{M3} \end{cases} = \begin{bmatrix} \theta_1(x_{M2} - x_{M1}) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_{M1} - x_{M1}x_{M3} + \theta_2x_{M2} \\ x_{M1}x_{M2} - \theta_3x_{M3} \\ y = x_{M1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_M \quad (6)$$

Se desea diseñar una ley de control por realimentación para la planta  $P$ , tal que, independientemente de las condiciones iniciales de  $P$  y  $M$ , obligue a la salida  $y_M(t)$  a converger asintóticamente con la salida  $y(t)$ .

El problema de acoplamiento a modelos (figura 1) se puede reducir al problema de desacoplar la salida de un sistema auxiliar  $E$  de la entrada  $u_M(t)$ . Para este propósito el sistema auxiliar es definido con ecuación 7.

$$E \begin{cases} \frac{dx_E}{dt} = f_E(x_E) + \hat{g}(x_E)u + \hat{g}_M(x_E)u_M \\ y_E = h_E(x_E) \end{cases} \quad (7)$$

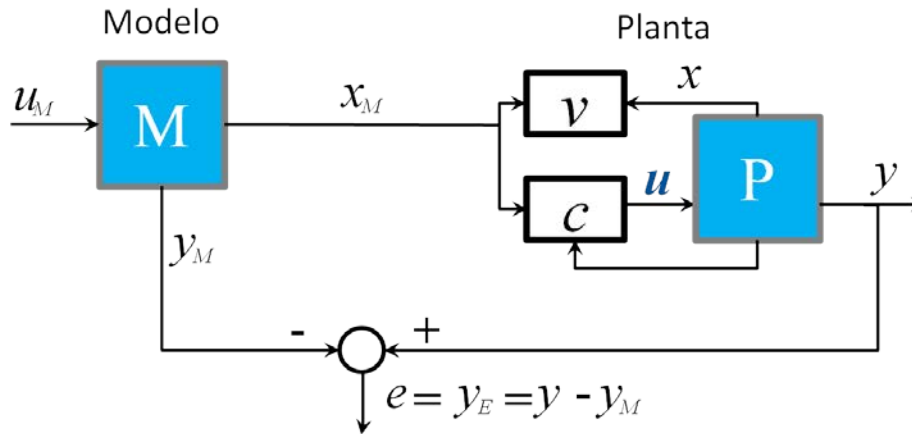


Figura 1 Esquema de sincronización por medio de Acoplamiento a Modelos.

Con los estados  $x_E = (x, x_M)^T \in R^{n+n_M}$ , y entradas  $u(t)$  y  $u_M(t)$ .

Donde:

$$f_E(x_E) = \begin{pmatrix} f(x) \\ f_M(x_M) \end{pmatrix}, \quad \hat{g}_E(x_E) = \begin{pmatrix} g(x) \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\hat{g}_M(x_E) = \begin{pmatrix} 0 \\ g_M(x_M) \end{pmatrix}, \quad h_E(x_E) = h(x) - h_M(x_M). \quad (8)$$

Para ello iniciaremos realizando el cambio de coordenadas, por ejemplo para  $P$ :

$$L_g h(x) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

$$L_f h(x) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2 \\ x_1x_2 - \theta_3x_3 \end{bmatrix} = \theta_1(x_2 - x_1)$$

$$\frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0]$$

$$L_g L_f h(x) = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

$$L_f^2 h(x) = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2 \\ x_1x_2 - \theta_3x_3 \end{bmatrix}$$

$$= -\theta_1^2(x_2 - x_1) + \theta_1((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2)$$

$$\frac{\partial L_f^2 h(x)}{\partial x} = [\theta_1(\theta_2 - x_3) \quad \theta_1(\theta_2 - \theta_1) \quad -\theta_1 x_1] = \theta_1 [(\theta_2 - x_3) \quad (\theta_2 - \theta_1) \quad -x_1]$$

$$L_g L_f^2 h(x) = [\theta_1(\theta_2 - x_3) \quad \theta_1(\theta_2 - \theta_1) \quad -\theta_1 x_1] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = -\theta_1 x_1$$

$$\begin{aligned} L_f^3 h(x) &= [\theta_1(\theta_2 - x_3) \quad \theta_1(\theta_2 - \theta_1) \quad -\theta_1 x_1] \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2 \\ x_1 x_2 - \theta_3 x_3 \end{bmatrix} \\ &= \theta_1(\theta_2 - x_3)\theta_1(x_2 - x_1) + \theta_1(\theta_2 - \theta_1)[(\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2] \\ &\quad - \theta_1 x_1 [x_1 x_2 - \theta_3 x_3] \\ &= \theta_1((\theta_2 - x_3)\dot{x}_1 + (\theta_2 - \theta_1)\dot{x}_2 - x_1(x_1 x_2 - \theta_3 x_3)) \end{aligned}$$

Obteniendo finalmente  $P$  expresado en nuevas coordenadas,

$$z_1 = h(x) = x_1$$

$$z_2 = L_f h(x) = \theta_1(x_2 - x_1)$$

$$z_3 = L_f^2 h(x) = -\theta_1^2(x_2 - x_1) + \theta_1((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2)$$

Debido a que en el sistema axilar  $E$ , la salida está definida como

$$e(t) = y_E(t) = h_E(x_E) = h(x) - h_M(x_M)$$

Y teniendo en cuenta que tanto  $P$  como  $M$  son sistemas idénticos, el cambio de coordenadas para  $M$  sería de forma similar al cambio en  $P$ . El sistema axilar  $E$  expresado en nuevas coordenadas queda de la siguiente manera:

$$\zeta_1 = x_1 - x_{M1}$$

$$\zeta_2 = \theta_1(x_2 - x_1) - \theta_1(x_{M2} - x_{M1})$$

$$\begin{aligned} \zeta_3 &= -\theta_1^2(x_2 - x_1) + \theta_1((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2) + \theta_1^2(x_{M2} - x_{M1}) - \theta_1((\theta_2 - \theta_1)x_{M1} \\ &\quad - x_{M1}x_{M3} + \theta_2 x_{M2}) \end{aligned}$$

Donde  $u$  está definido como

$$u = \frac{1}{L_g L_f^2 h(x)} (v - L_f^3 h(x) + L_{fM}^3 h_M(x_M) + L_{gM} L_{fM}^2 h_M(x_M) u_M)$$

Sustituyendo,

$$u = \frac{1}{-\theta_1 x_1} (v - \theta_1((\theta_2 - x_3)\dot{x}_1 + (\theta_2 - \theta_1)\dot{x}_2 - x_1(x_1 x_2 - \theta_3 x_3)) + \theta_1((\theta_2 - x_{M3})\dot{x}_{M1} + (\theta_2 - \theta_1)\dot{x}_{M2} - x_{M1}(x_{M1} x_{M2} - \theta_3 x_{M3})) - \theta_1 x_{M1} u_M)$$

Siendo  $v$ , definido como

$$v = -C\zeta = -c_0\zeta_1 - c_1\zeta_2 - c_2\zeta_3$$

Eligiendo los polos en -3, obtenemos  $C = (27 \quad 27 \quad 9)$ .

La ley de control tiene una restricción debió a que el termino  $L_g L_f^2 h(x)$  depende de uno de los estados del sistema, por lo cual en algún momento, cuando el estado  $x_1 = 0$ , se indeterminada la ley de control.

Para intentar solucionar lo anterior plantearemos un cambio en la manera en que se elige la entrada a los osciladores caóticos, de tal forma que el grado relativo del sistema sea  $r = 2$

Sea el oscilador  $P$  la planta, y  $M$  el modelo, cuyos parámetros son idénticos,

$$P \begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2 \\ x_1 x_2 - \theta_3 x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

$$y = x_1$$

$$M \begin{cases} \dot{x}_{M1} \\ \dot{x}_{M2} \\ \dot{x}_{M3} \end{cases} = \begin{bmatrix} \theta_1(x_{M2} - x_{M1}) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_{M1} - x_{M1} x_{M3} + \theta_2 x_{M2} \\ x_{M1} x_{M2} - \theta_3 x_{M3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u_M$$

$$y = x_{M1}$$

Cambiando de coordenadas el sistema:

$$L_g h(x) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$L_f h(x) = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1 x_3 + \theta_2 x_2 \\ x_1 x_2 - \theta_3 x_3 \end{bmatrix} = \theta_1(x_2 - x_1)$$

$$\frac{\partial L_f h(x)}{\partial x} = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0]$$

$$L_g L_f h(x) = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \theta_1 \neq 0$$



$$L_f^2 h(x) = [-\theta_1 \quad \theta_1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_1(x_2 - x_1) \\ (\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2 \\ x_1x_2 - \theta_3x_3 \end{bmatrix}$$

$$= -\theta_1^2(x_2 - x_1) + \theta_1((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2)$$

De tal modo que nos queda,

$$z_1 = \varphi_1 = h(x) = x_1$$

$$z_2 = \varphi_2 = L_f h(x) = \theta_1(x_2 - x_1)$$

Y buscaremos una función para  $\varphi_3$  tal que:

$$\frac{\partial \varphi_3}{\partial x} g(x) = \frac{\partial \varphi_3}{\partial x_2} = 0$$

Se propone  $\varphi_3 = x_3$ , lo cual satisface la condición anterior. Esta y las dos funciones anteriores definen la transformación de coordenadas del sistema, cuya matriz jacobina está dada por:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\theta_1 & \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La cual es no singular e invertible.

Teniendo en cuenta que tanto  $P$  como  $M$  son sistemas idénticos, el cambio de coordenadas para  $M$  sería de forma similar al cambio en  $P$ . El sistema axilar  $E$  expresado en nuevas coordenadas queda de la siguiente manera:

$$\zeta_1 = x_1 - x_{M1}$$

$$\zeta_2 = \theta_1(x_2 - x_1) - \theta_1(x_{M2} - x_{M1})$$

$$\zeta_3 = x_3 - x_{M3}$$

Donde  $u$  está definido como

$$u = \frac{1}{L_g L_f h(x)} (v - L_f^2 h(x) + L_{fM}^2 h_M(x_M) + L_{gM} L_{fM} h_M(x_M) u_M)$$

Sustituyendo,

$$u = \frac{1}{\theta_1} (v + \theta_1^2 (x_2 - x_1) - \theta_1 ((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2) - \theta_1^2 (x_2 - x_1) + \theta_1 ((\theta_2 - \theta_1)x_1 - x_1x_3 + \theta_2x_2) + \theta_1 u_w)$$

Siendo  $v$ , definido como

$$v = -C\zeta = -c_0\zeta_1 - c_1\zeta_2 - c_2\zeta_3$$

Eligiendo los polos en -3, obtenemos  $C = (27 \quad 27 \quad 9)$ .

La ley de control ya no tiene la restricción debió a que el termino  $L_g L_f h(x)$  ya no depende de ningún estado del sistema.

Finalmente, analizaremos la dinámica interna del sistema (dinámica cero).

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 & x_1 &= z_1 \\ z_2 &= \theta_1(x_2 - x_1) & x_2 &= \frac{z_2}{\theta_1} + x_1 = \frac{z_2}{\theta_1} + z_1 \\ z_3 &= x_3 & x_3 &= z_3 \end{aligned}$$

Quedando expresado el sistema en nuevas coordenadas,

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2 \\ \dot{z}_2 &= \theta_1 \left[ (\theta_2 - \theta_1)z_1 - z_1z_3 + \theta_2 \left( \frac{z_2}{\theta_1} + z_1 \right) + u - z_2 \right] \\ \dot{z}_3 &= z_1 \left( \frac{z_2}{\theta_1} + z_1 \right) - \theta_3 z_3 \end{aligned}$$

Con  $z_1 = z_2 = 0$  nos queda,

$$\dot{z}_3 = -\theta_3 z_3$$

Considerando el sistema auxiliar, nos queda que la dinámica cero del sistema auxiliar está gobernada por

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}_3 &= -\theta_3 z_3 + \theta_3 z_{M3} \\ \dot{\zeta}_3 &= -\theta_3 (z_3 - z_{M3}) \\ \dot{\zeta}_3 &= -\theta_3 \zeta_3 \end{aligned}$$

La cual es asintóticamente estable.

Solución:

$$\begin{aligned}\dot{\zeta}_3 &= -\theta_3 \zeta_3 \\ \frac{d\zeta_3}{dt} &= -\theta_3 \zeta_3 \\ \int \frac{d\zeta_3}{\zeta_3} &= \int -\theta_3 dt \\ \ln(\zeta_3) &= -\theta_3 t \\ \zeta_3 \Big|_{\zeta_3^1}^{\zeta_3^0} &= e^{-\theta_3 t} \Big|_{t_1}^{t_0}\end{aligned}$$

Se realizaron simulaciones para comprobar que la ley de control logra sincronizar ambos osciladores caóticos partiendo de las siguientes condiciones iniciales:

$$x_1 = 3, \quad x_2 = 1, \quad x_3 = 6, \quad x_{M1} = 5, \quad x_{M2} = 8, \quad x_{M3} = 1$$

De un tiempo inicial  $t_0 = 0$  a un tiempo final  $t_f = 10$ , figuras 2, 3, 4 y 5.

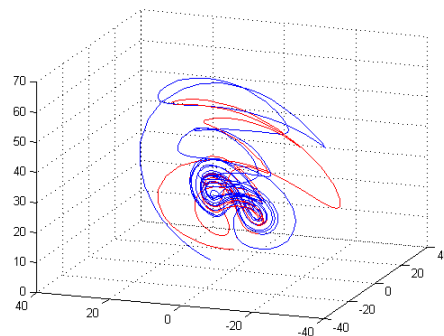


Figura 2 Vista 3D de los osciladores caóticos.

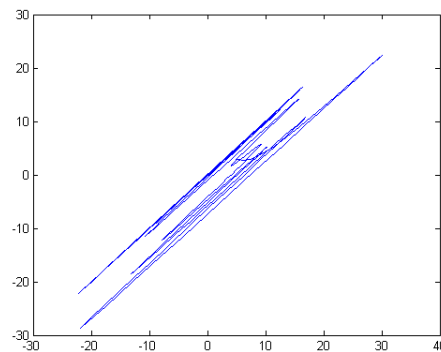


Figura 3 Trazo de los estados  $x_1$  vs  $x_{1m}$ .

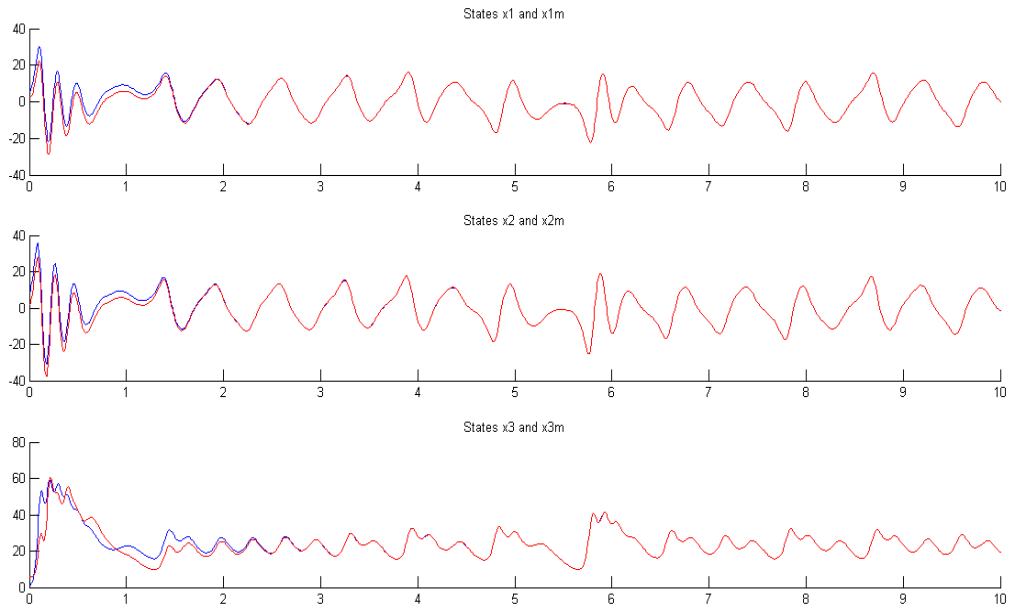


Figura 4 Señales temporales en la sincronización de dos sistemas de Chen.

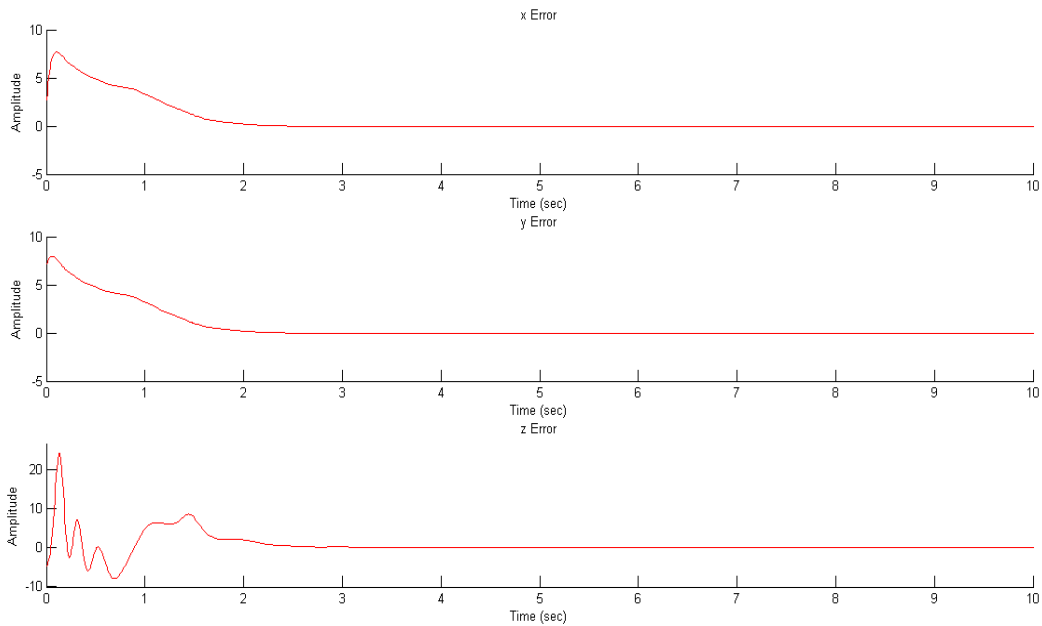


Figura 5 Señales error sincronización, tres estados en sincronización, dos sistemas Chen.

### Sincronización de redes de sistemas complejos

Desde el punto de vista matemático, una red puede ser representada por un grafo. En donde dos nodos (vértices o puntos) unidos por una conexión (aristas o

líneas) son llamados nodos adyacentes o vecinos. Algunas de las características más destacables que presentan los sistemas complejos son:

- Están compuestos de muchas partes que interactúan entre sí (nodos).
- Cada parte tiene estructura interna propia y está encargada de una tarea específica.

La topología o acoplamiento es la disposición o la forma en que están conectados los nodos de una red, mientras que la configuración es el tipo de conexión que determina el flujo de información entre nodos, figura 6.



Figura 6 Configuración unidireccional (Maestro-esclavo). (b) Configuración bidireccional.

La matriz de acoplamiento  $A = (a_{ij}) \in R^{N \times N}$  representa el acoplamiento de la red. Si existe una conexión entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$  entonces el elemento  $a_{ij} = 1$  en caso contrario  $a_{ij} = 0$ . Los elementos de la diagonal  $A$  están definidos como:

$$a_{ii} = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} = - \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ji}$$

para  $i = 1, 2, \dots, N$

Tomando en cuenta estas definiciones tomadas de la teoría de grafos, así como haciendo algunas adecuaciones, podemos formular una ley generalizada que nos permita sincronizar redes complejas de  $N$  sistemas utilizando el esquema de Acoplamiento a Modelos, y adaptando a nuestro esquema en particular la matriz de acoplamiento, tomando en cuenta que el esquema de Acoplamiento a Modelos impone las siguientes restricciones:

- El acoplamiento solo puede ser de tipo unidireccional, ya que el esquema de Acoplamiento a Modelos requiere una configuración Maestro-Esclavo.
- Un nodo (o sistema caótico) solo puede estar acoplado a un maestro. Aunque un maestro lo puede ser para varios nodos.

### 3. Resultados en sincronización de redes de sistemas complejos

Considere una red compuesta por 5 osciladores caóticos de Rössler, con grado relativo  $r=3$ .

$$R_i \begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \\ \dot{x}_{i3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{i2} - x_{i3} \\ x_{i1} + \alpha x_{i2} \\ \alpha x_{i3}(x_{i1} - \mu) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u_i \\ y_i = x_{i2} \end{cases}$$

Donde  $R_i$  son los sistemas caóticos de Rössler, para  $i = 1, 2, \dots, 5$ .

Podemos ahora considerar la ley de control  $u_i$  que se mostró en la sección previa, como sigue:

$$u_i = \sum_{j=1}^N a_{ij} u_{ij}$$

O también como:

$$\begin{aligned} u_1 &= a_{11}u_{11} + a_{12}u_{12} + \dots + a_{1N}u_{1N} \\ u_2 &= a_{21}u_{21} + a_{22}u_{22} + \dots + a_{2N}u_{2N} \\ u_N &= a_{N1}u_{N1} + a_{N2}u_{N2} + \dots + a_{NN}u_{NN} \end{aligned}$$

Donde:

$$u_{ij} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(X_i)} (V_{ij} - L_f^r h(X_i) + L_f^r h(X_j) + L_g L_f^{r-1} h(X_j) * \hat{u}_j)$$

Ahora, consideremos la siguiente topología estrella de acoplamiento para los 5 osciladores idénticos de Rössler, mostrada en la figura 7, donde el nodo número 1 es el maestro para el resto de los nodos, y cuya matriz de acoplamiento  $A$  que representa dicha topología está definida como:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

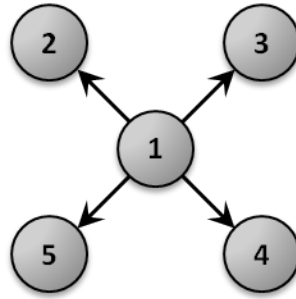


Figura 7 Topología estrella de acoplamiento 5 sistemas Rössler.

Las 5 leyes de control resultantes para cada sistema quedan como:

$$u_1 = 0$$

$$u_2 = u_{21} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(X_2)} (V_{21} - L_f^r h(X_2) + L_f^r h(X_1) + L_g L_f^{r-1} h(X_1) * \hat{u}_1)$$

$$u_3 = u_{31} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(X_3)} (V_{31} - L_f^r h(X_3) + L_f^r h(X_1) + L_g L_f^{r-1} h(X_1) * \hat{u}_1)$$

$$u_4 = u_{41} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(X_4)} (V_{41} - L_f^r h(X_4) + L_f^r h(X_1) + L_g L_f^{r-1} h(X_1) * \hat{u}_1)$$

$$u_5 = u_{51} = \frac{1}{L_g L_f^{r-1} h(X_5)} (V_{51} - L_f^r h(X_5) + L_f^r h(X_1) + L_g L_f^{r-1} h(X_1) * \hat{u}_1)$$

Y considerando la señal externa  $\hat{u}_1 = 0$ , figuras 8 y 9.

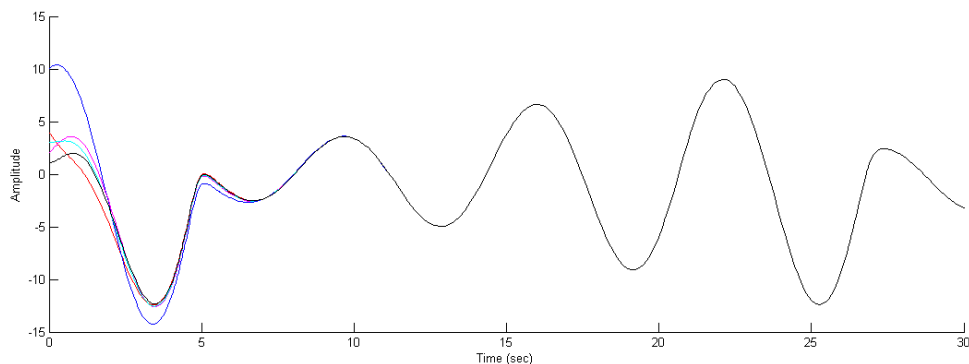


Figura 8 Sincronización red compuesta 5 osciladores de Rössler, acoplamiento estrella.

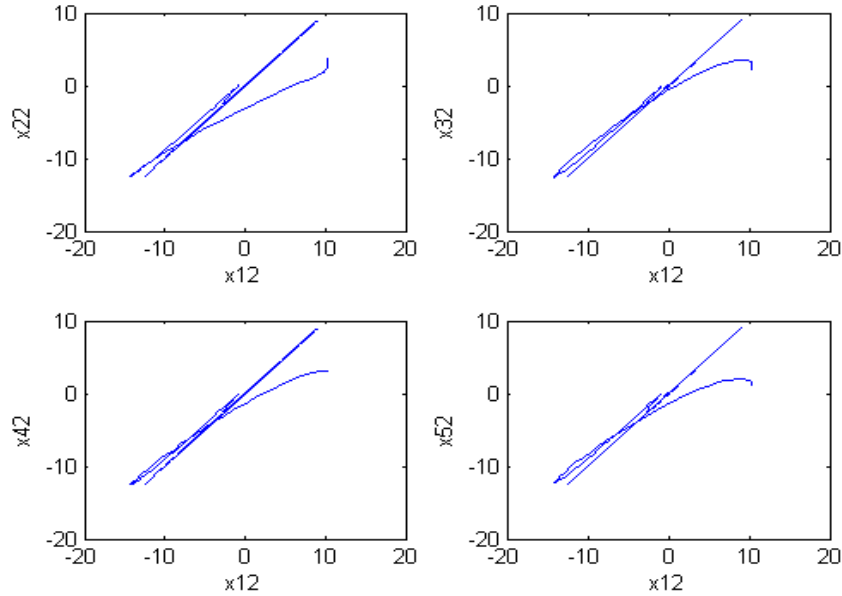


Figura 9 Sincronización de las salidas  $x_{12}$  y  $x_{i2}$ , for  $i = 2, 3, 4, 5$ .

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se presenta la sincronización de osciladores caóticos usando acoplamiento a modelos. Primero se trató el tema para una pareja de osciladores caóticos y posteriormente se extendió a una red de cinco osciladores en topología estrella. Se puede observar que la técnica de Acoplamiento a Modelos es totalmente sistemática. Es decir, la técnica se puede seguir paso a paso y se puede adaptar a la sincronización de redes de osciladores caóticos.

En algunos casos, la ley de control puede contener denominadores que dependan de alguno de los estados, siendo esto una restricción, debido a que en algún momento este puede indeterminar la ley de control, cuando el estado fuera igual a cero. Una solución puede ser adecuar las condiciones iniciales y alcanzar sincronía antes que el estado sea igual a cero, mediante ganancias muy grandes en el sistema auxiliar, lo cual es poco conveniente. En este trabajo se optó por elegir un *grado relativo* menor, con lo que la restricción se eliminó. Elegir un grado relativo menor implica generar dinámicas cero, pero se presentó el análisis de estabilidad de dichas dinámicas. Se obtuvo una expresión generalizada de la ley de control que nos permite sincronizar una red compleja, utilizando Acoplamiento a Modelos y basándonos en conceptos tomados de la teoría de grafos. Además,



se realizaron simulaciones numéricas considerando diferentes topologías de acoplamiento, incluyendo en algunos casos acoplamiento bidireccional.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] S.H. Strogatz, "SYNC: The Emerging Science of Spontaneous Order". SIAM Review. Vol. 45. No. 3. 2003. Pp. 616-617.
- [2] E.N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow". Journal of the Atmospheric Sciences. Vol. 32. No. 4. 1963. Pp. 475-480.
- [3] L. Bernardo, P.B. Lopes, "Quadrature Chaotic Symbolic OFDM Communication Over Radio Channels". IEEE Latin America Trans. Vol. 11. No. 3. 2013. Pp. 907-912.
- [4] K.M. Cuomo, A.V. Oppenheim, S.H. Strogatz, "Synchronization of Lorenz-based chaotic circuits with applications to communications". IEEE Trans. Circuits Syst. II. Vol. 40. No. 10. 1993. Pp. 626-633.
- [5] C.W. Wu, L.O. Chua, "A simple way to synchronize chaotic systems with applications to secure communication systems". Int. J. Bifurc. Chaos. Vol. 3. No. 6. 1993. Pp. 1619-1627.
- [6] L. Kocarev, K.S. Halle, K. Eckert, L.O. Chua, "Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization". Int. J. Bifurc. Chaos. Vol. 2. No. 3. 1992. Pp. 709-713.
- [7] P. Tass, M.G. Rosenblum, J. Weule, J. Kurths, A. Pikovsky, J. Volkmmann, A. Schnitzler, H.J. Freund, "Detection of n:m phase locking from noisy data: Application to magnetoencephalography". Phys. Rev. Lett. Vol. 81. No. 15. 1998. Pp. 3291-3294.
- [8] F. Mormann, K. Lehnertz, P. David, C.E. Elger, "Mean phase coherence as a measure for phase synchronization and its application to the EEG of epilepsy patients". Physica D. Vol. 144. 2000. Pp. 358-369.
- [9] M.B. Lotric, A. Stefanovska, "Synchronization and modulation in the human cardiorespiratory system". Physica A. Vol. 283. No. 3-4. 2000. Pp. 451-461.
- [10] A.T. Winfree, "Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators". J. Theor. Biol. Vol. 16. 1967. Pp. 15-42.

- [11] L.M. Pecora, T.L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems". *Physical review letters*. Vol. 64. No. 8. 1990. Pp. 821-825.
- [12] J. Zhao, S. Wang, Y. Chang, "A novel image encryption scheme based on an improper fractional-order chaotic system". *Nonlinear Dynamics*. Vol. 80. No. 4. 2015. Pp. 1721-1729.
- [13] Q. Fang, J. Peng, F. Cao, "Synchronization and Control of Linearly Coupled Singular Systems". *Mathematical Problems in Engineering*. Vol. 2014. No. 230741. 2014. Pp. 1-8.
- [14] O. García-Sepúlveda, *Encriptado de datos con osciladores caóticos de orden fraccionario*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. FIME. 2015.
- [15] M. Zanin, J.R. Sevilla-Escoboza, R. Jaimes-Reátegui, J.H. García-López, G. Huerta-Cuéllar, A. Pisarchik, "Synchronization attack to chaotic communications systems". *Discontinuity, Nonlinearity, and Complexity*. Vol. 2. No. 4. 2013. Pp. 333-343.
- [16] A.G. Soriano-Sánchez, C. Posadas-Castillo, M.A. Platas-Garza, "Synchronization of generalized Chua's chaotic oscillators in small-world topology". *Journal of Engineering Science and Technology Review*. Vol. 8. No. 2. 2015. Pp. 174-180.
- [17] M. Ding, W. Yang, "Synchronizing Chaos and Hyperchaos with Any Scalar Transmitted Signal". *IEEE Transactions on Circuits & Systems Part I: Fundamental Theory & Applications*. Vol. 45. No. 10. 1996. Pag. 1101.
- [18] D. López-Mancilla, *Sincronización de osciladores caóticos perturbados con aplicación a sistemas de comunicaciones*. Tesis Doctoral. CICESE. Ensenada, Baja California. 2015.

## 6. Autores

Dr. Didier López Mancilla es Ingeniero en Electrónica, graduado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, ITTG. Realizó una Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Guanajuato y obtuvo su Doctorado en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones en el Centro de Investigación Científica y de

Educación Superior de Ensenada, CICESE. Actualmente es Profesor Investigador en la Universidad de Guadalajara y trabaja en temas afines a sincronización y control de sistemas complejos y algunas aplicaciones potenciales.

Ing. Gerardo López Cahuich es Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad de Guadalajara. Actualmente cursa la Maestría en Ciencias en Ciencia y Tecnología en el Centro Universitario de los Lagos de la Universidad de Guadalajara.

# LA TECNOLOGÍA MEMS COMO AUXILIAR EN EL POSICIONAMIENTO GPS A BAJO COSTO

***Luis Francisco Dávila Araiza***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*luis.fdavila89@gmail.com*

***Efrén González Ramírez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*luis.fdavila89@gmail.com*

***José Ismael de la Rosa Vargas***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*luis.fdavila89@gmail.com*

***José de Jesús Villa Hernández***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*luis.fdavila89@gmail.com*

## **Resumen**

Hoy en día la navegación por GPS es una herramienta cotidiana muy útil para la humanidad, gracias a esta tecnología las personas pueden desplazarse por lugares en los cuales no han estado antes con cierto grado de precisión. La ubicación de un punto sobre la superficie terrestre se hace por medio de un satélite transmisor y un receptor que se ubica por medio del principio de Triangulación. Los Sistemas-Micro-Electro-Mecánicos o MEMS, son una tecnología que, en su forma más general puede ser definida como elementos electro-mecánicos miniaturizados que se realizan con técnicas de micro - fabricación.

Las unidades de medición inercial o IMU, son dispositivos que miden aceleración y orientación, que implementados con algún procesador o sistema de cómputos permiten crear un sistema de navegación inercial o INS. El enfoque de esta

investigación es crear un sistema de bajo costo que permita fusionar los datos provenientes de los sistemas IMU/GPS mediante un filtro Kalman, esto con la finalidad de aprovechar las características propias de cada sistema y mejorar la precisión del posicionamiento por GPS. Con el uso de este sistema mediante sensores comerciales de bajo costo se hace posible mejorar la precisión del posicionamiento GPS con hasta un 3.03%.

**Palabra(s) Clave(s):** GPS, IMU, INS, KALMAN, MEMS.

## **1. Introducción**

Los sistemas globales de posicionamiento por satélite o GNSS (por sus siglas en inglés) [1], han sido una poderosa herramienta para conocer nuestra posición en cualquier parte de la superficie terrestre con cierto grado de precisión según sea el dispositivo que se utilice.

El GPS es uno de estos GNSS [2]. Dicho sistema nos permite conocer nuestra ubicación con un rango de 15 a 30 metros aproximadamente utilizando GPS comerciales, esta precisión es aceptable para las aplicaciones cotidianas donde no es necesaria una precisión mayor, pero existen casos en los que es necesario tener una mayor precisión como lo es la trayectoria de misiles, navegación de vehículos aéreos no tripuladas, etc.

Dentro de los dispositivos que se utilizan actualmente en la navegación están las unidades de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Unit) [3]. Estos dispositivos incorporan sensores como acelerómetros, giroscopios, magnetómetros, barómetros, entre otros, para obtener información sobre la posición, velocidad, aceleración, orientación, altitud, etc.

Un sistema de navegación inercial o INS (Inertial Navigation System), es el encargado de procesar toda la información proveniente de la IMU y así calcular orientación y posición del vehículo o aeronave que se desee utilizar [4].

Todos estos dispositivos pueden funcionar de manera conjunta para mejorar la precisión de todo el sistema en sí, lo que lleva a un mayor desempeño en las aplicaciones donde se requiera una mayor precisión, lo que aumenta considerablemente el campo de aplicación de sistemas de este tipo.

El Filtro de Kalman es un algoritmo que permite conocer el estado oculto (no medible) de un sistema lineal, además funciona cuando el sistema está sometido a ruido blanco aditivo.

Esta investigación propone que estas herramientas en conjunto pueden ser utilizadas para lograr mejorar la precisión del sistema GPS y con ello disminuir el error de dicho sistema (con base en la información anterior y lo mostrado en [5]). Esto permitirá al usuario tener una mayor precisión de la posición a un costo menor que los sistemas comerciales.

Con el uso de este sistema, (mediante sensores comerciales de bajo costo), se hace posible mejorar la precisión del posicionamiento GPS con hasta un 3.03%.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 se enfoca en los conceptos de orientación y las distintas maneras de hacerlo. En la sección 3 se presenta lo relacionado a la navegación inercial y características de los sensores. En la sección 4 se explica brevemente el filtro de kalman así como su estructura. La sección 5 presenta la implementación del algoritmo de fusión GPS/INS/Kalman para una prueba simulada y para una prueba de campo real. En la sección 6 se da una breve descripción del hardware y software utilizado. Finalmente en la sección 7, se presentan algunas conclusiones.

## **2. Orientación**

### **Sistemas de Referencia**

Un sistema de referencia es un sistema de coordenadas que permite localizar una posición cualquiera en un espacio dimensional. Existen diferentes sistemas de referencia que pueden usarse según sea la aplicación deseada [6].

#### **Sistema de referencia de Navegación (n-frame)**

Este sistema de referencia también se le conoce como NED (North, East, Down) ya que sus ejes apuntan a dichas direcciones, se denominan a los ejes de navegación como  $x_n$  al que apunta al norte,  $y_n$  al que apunta al este y  $z_n$  al que apunta hacia abajo, teniendo como origen la localización del sistema de navegación, como se observa en la figura 1.

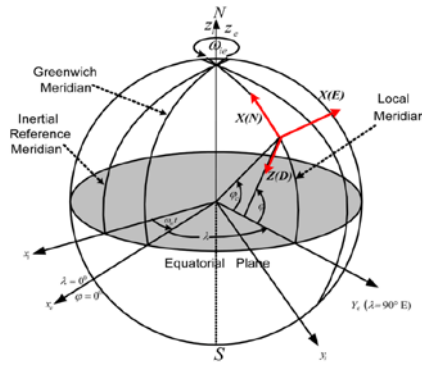


Figura 1 Sistema de referencia de navegación. [13]

### Sistema de Referencia de Body (b-frame)

Es el sistema de referencia del móvil en cuestión cuyo origen es el del sistema de referencia del sensor, el eje Z alineado a la elipsoidal normal en un punto en dirección hacia abajo, el eje X en dirección del movimiento del vehículo, el eje Y apuntando a la derecha y completando un marco ortogonal como se muestra en la figura 2.

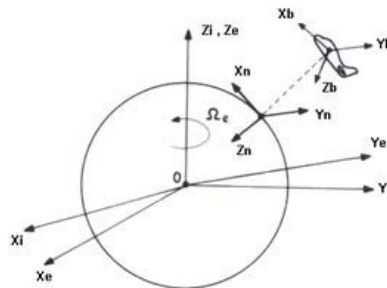


Figura 2 Sistema de referencia body. [14]

### Ángulos de Euler

Los ángulos de Euler constituyen un conjunto de tres coordenadas angulares que sirven para especificar la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil, respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos [3].

Dados dos sistemas de coordenadas  $x_1, y_1, z_1$  y  $x_b, y_b, z_b$  con origen común, es posible especificar la posición de un sistema en términos del otro usando tres ángulos  $\Phi$  (eje x),  $\theta$  (eje y), y  $\Psi$  (eje z). Dichos ángulos son llamados Roll, Pitch, y Yaw respectivamente.

## Matriz de Cosenos Directores DCM

La Matriz de Cosenos Directores DCM es una matriz de 3x3 donde cada fila corresponde a los vectores unitarios del sistema de referencia rotado en el sistema de referencia fijo, es decir, los cosenos de los ángulos formados por cada eje del sistema rotado con los ejes del sistema fijo. En la ecuación 1 se muestra una matriz DCM de sistema body a sistema de navegación.

$$DCM = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\Psi & \cos\theta\sin\Psi & -\sin\theta \\ \sin\Phi\sin\theta\cos\Psi - \sin\Psi\cos\Phi & \sin\Phi\sin\theta\sin\Psi + \cos\Phi\cos\Psi & \sin\Phi\cos\theta \\ \sin\theta\cos\Psi\cos\Phi + \sin\Phi\sin\Psi & \sin\Psi\sin\theta\cos\Phi - \cos\Psi\sin\Phi & \cos\Phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

## Cuaterniones

Los cuaterniones son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos. Mientras que los números complejos son una extensión de los reales por la adición de la unidad imaginaria  $i$ , tal que  $i^2 = -1$ , los cuaterniones son una extensión generada de manera análoga añadiendo las unidades imaginarias  $i, j$  y  $k$  a los números reales (Ver ecuación 2), tal que  $i^2 = j^2 = k^2 = -1$ .

$$q = a + a_1i + a_2j + a_3k \quad (2)$$

## 3. Navegación Inercial

La navegación inercial es una técnica de navegación autónoma en donde las mediciones obtenidas de sensores como acelerómetros y giroscopios son usadas para trazar la posición y orientación de un objeto respecto a un punto, orientación y velocidad conocidos [7].

### IMU

La Unidad de Medición Inercial es la encargada de medir la velocidad angular y aceleración lineal de un objeto mediante la incorporación de sensores como acelerómetros y giroscopios, aunque también pueden incorporarse otros sensores como lo son los magnetómetros, barómetros, etc.

### Acelerómetro

Se denomina acelerómetro a cualquier instrumento destinado a medir aceleraciones [8]. Esto no es necesariamente la misma que la aceleración de



coordenadas (cambio de la velocidad del dispositivo en el espacio), sino que es el tipo de aceleración asociada con el fenómeno de peso experimentado por una masa de prueba que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo. Un ejemplo se de este dispositivo se muestra en la figura 3.



Figura 3 Acelerómetro modelo adxl345. [15]

## Giroscopio

El giroscopio es un dispositivo que mide velocidad angular o ángulo de rotación respecto a un sistema inercial. El principio de funcionamiento del giroscopio está basado en la conservación del momento angular. La estructura de los ejes del giroscopio se muestra en la figura 4.

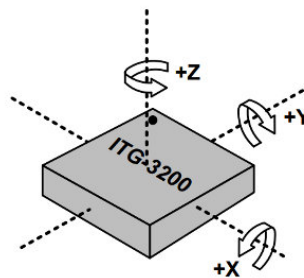


Figura 4 Orientación ejes del giroscopio. [16]

## 4. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un filtro recursivo de predicción que se basa en el uso de técnicas de espacio de estados y los algoritmos recursivos. Este filtro es una herramienta poderosa empleada para controlar los sistemas ruidosos,

específicamente para identificar el problema lineal cuadrático, cuando este es sometido a ruido blanco aditivo [9].

El estimador resultante es estadísticamente óptimo con respecto a cualquier función cuadrática de estimación del error. La ventaja de este algoritmo respecto a otros, es que el filtro de kalman es capaz de escoger la forma óptima cuando se conocen las varianzas de los ruidos que afectan al sistema, además es el mejor estimador lineal si sus vectores tienen estadísticas arbitrarias y si estas son variables aleatorias normales.

El filtro de Kalman aborda el problema general de tratar de estimar el estado  $x \in R^m$  de un proceso controlado de tiempo discreto que se rige por la ecuación diferencial estocástica lineal siguiente:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (3)$$

Con mediciones  $z \in R^m$ , esto es:

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (4)$$

El algoritmo y estructura del filtro de kalman se muestra en figura 5.

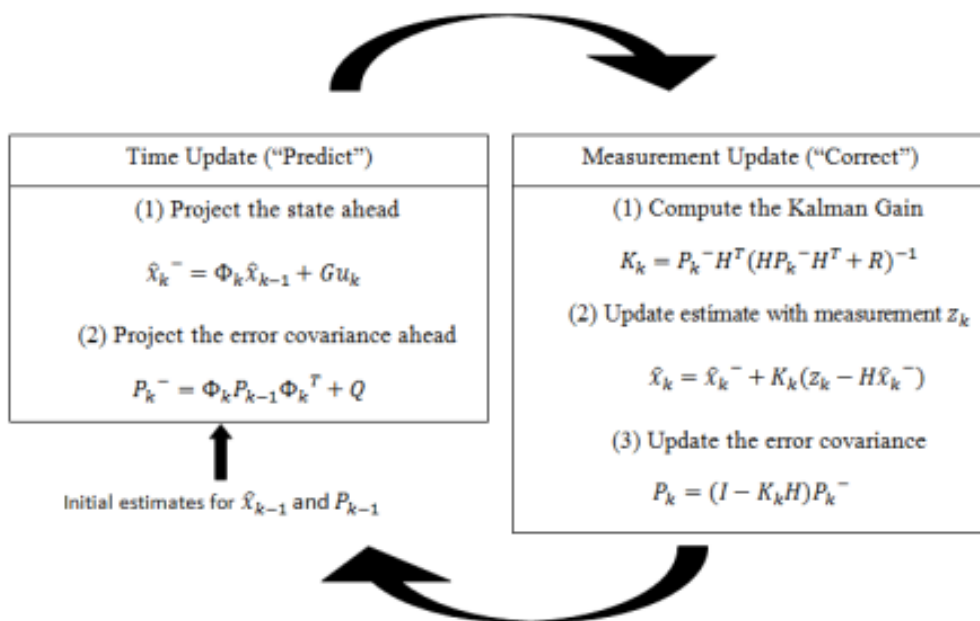


Figura 5 Algoritmo filtro de kalman discreto. [17]

## 5. Implementación

Las plataformas de las IMU son la manera en que ésta se sujeta al objeto de interés, permitiendo así diferentes maneras de obtener medidas de los sensores según el sistema de referencia que se utilice [10].

Para este caso utilizaremos una plataforma del tipo strapdown, por lo que estará sujeta al objeto de interés como se muestra en la figura 6.

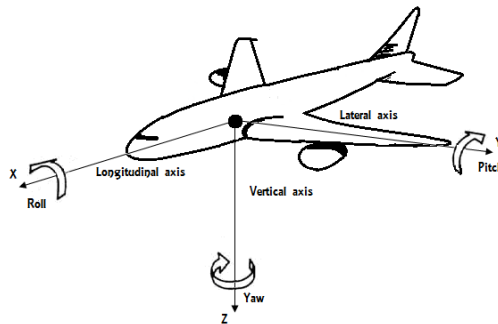


Figura 6 Orientación de los ejes de la plataforma strapdown [18].

El algoritmo para obtener posición y orientación mediante una IMU en configuración strapdown se muestra en la figura 7.

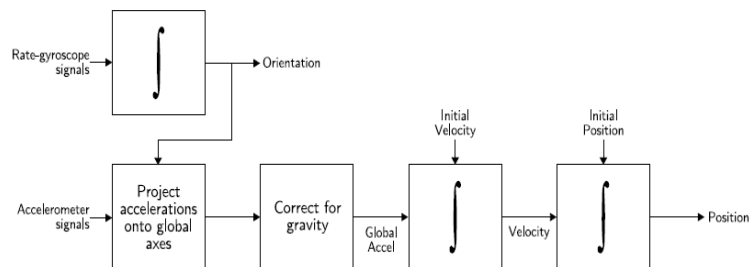


Figura 7 Diagrama de algoritmo INS para plataforma strapdown [19].

### Orientación y Posición

Las integraciones para obtener orientación y velocidad se realizaron mediante el método numérico de Runge Kutta de 4to orden usando las funciones de orientación expresada en cuaterniones con condiciones iniciales y de la corrección de la aceleración, como se muestra en ecuaciones 5, 6, 7 y 8; funciones para orientación mediante cuaterniones.

$$f_1 = -\frac{1}{2}((e_1 * p_n) + (e_2 * q_n) + (e_3 * r_n)) \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{1}{2}((e_0 * p_n) + (e_2 * r_n) - (e_3 * q_n)) \quad (6)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}((e_0 * q_n) + (e_3 * p_n) - (e_1 * r_n)) \quad (7)$$

$$f_3 = \frac{1}{2}((e_0 * r_n) + (-e_1 * q_n) - (e_2 * p_n)) \quad (8)$$

Donde  $e_0, e_1, e_2$  y  $e_3$  son los parámetros del cuaternión.

Funciones para corrección de aceleración para posteriormente obtener velocidad y posición, ecuaciones 9, 10 y 11.

$$f_1 = a_x + (V * r) - (W * q) + (g * \sin(\theta)) \quad (9)$$

$$f_2 = a_y - (U * r) + (W * p) - (g * \cos(\theta) * \sin(\Phi)) \quad (10)$$

$$f_2 = a_z + (U * q) - (V * p) - (g * \cos(\theta) * \cos(\Phi)) \quad (11)$$

Donde  $U, V, W$  son velocidades en sistema body, por su parte  $p, q, r$  son velocidades angulares medidas por el giroscopio y  $\Phi, \theta$  son los ángulos de Euler, roll y pitch, respectivamente.

### Cambio de sistema de referencia y obtención de la posición

Una vez que tenemos las velocidades  $U, V, W$  las cuales están en sistema de referencia de body, es necesario convertirlas a sistema de referencia de navegación NED (Norte, Este y Abajo), para esto haremos lo siguiente, ecuación 12.

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{bmatrix} = DCM_b^n \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (12)$$

Ahora que tenemos las velocidades solo queda hacer una integración numérica para obtener la posición en sistema de referencia de navegación.

## 6. Prueba simulada

Para la simulación se tomó un vector posición  $r$  cuyas componentes son  $(r_i, r_j, r_k)$ , el cual será derivado para obtener los vectores de velocidad y aceleración necesarios para simular los datos medidos por el acelerómetro. Estas componentes del vector de posición se muestran a continuación, ecuaciones 13, 14 y 15

$$r_i = 50 \cos t \quad (13)$$

$$r_j = 30 \sin t \quad (14)$$

$$r_k = t^2 \quad (15)$$

La trayectoria que representa nuestro vector posición para valores de "t" entre 0 y  $(2\pi + \Delta t)$  con incrementos  $\Delta t = 0.001$ .

Se obtuvieron los siguientes resultados en la prueba simulada como se ve en las figuras 8 a 13 (Tomando la estructura del algoritmo propuesto en [11] y [12]).

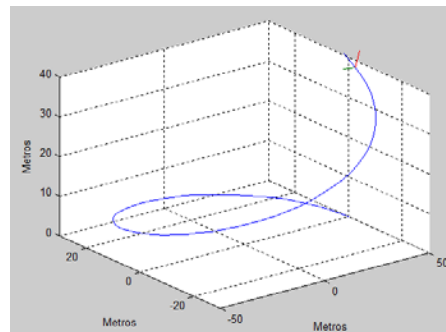


Figura 8 Trayectoria simulada.

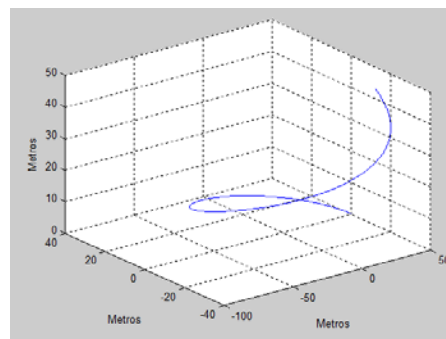


Figura 9 Trayectoria obtenida por IMU/GPS.

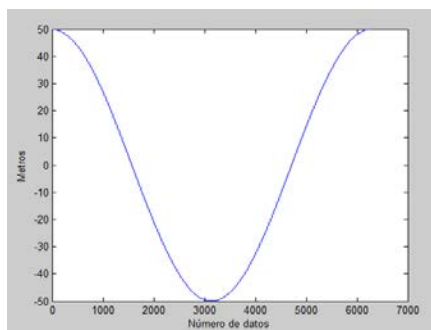


Figura 10 Posición Este simulada.

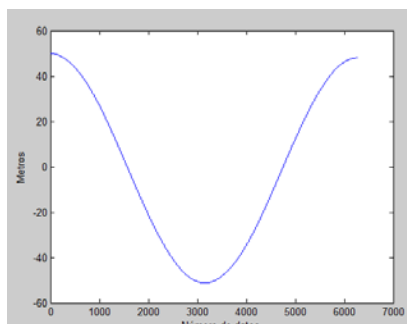


Figura 11 Posición Este algoritmo IMU/GPS.

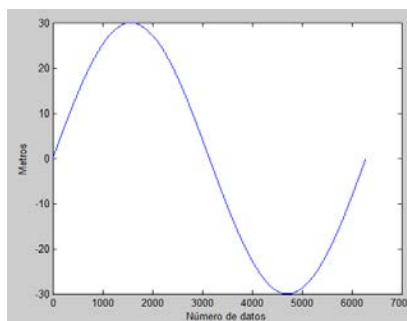


Figura 12 Posición Norte simulada.

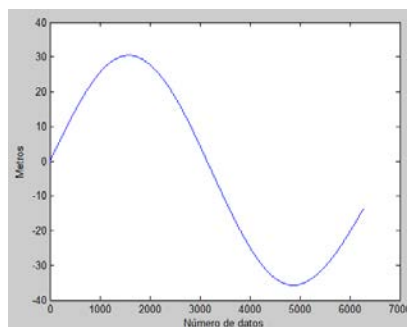


Figura 13 Posición Norte algoritmo IMU/GPS

## 7. Prueba de campo real

El lugar donde se realizó la prueba de adquisición de datos de nuestro sistema IMU/GPS fue en un campo de beisbol. Dicho lugar cuenta con una zona UTM 14Q y una altitud media de 2032 m. En la figura 14 se muestra la trayectoria en Google Maps de dicho lugar.



Figura 14 Lugar de prueba de adquisición de datos.

Este lugar se eligió debido a que se deseaba un lugar despejado en el cual se redujera la posibilidad de error por multi-trayectoria ya que no se encuentran muchos edificios cerca que pudieran rebotar la señal que recibe el receptor GPS. AL aplicar el algoritmo propuesto se obtuvo lo siguiente mostrado en las figuras 15 a 19.

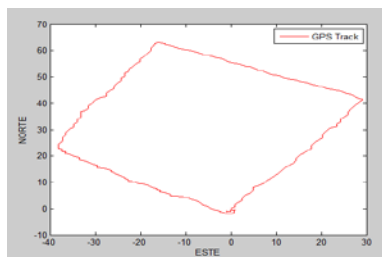


Figura 15 Trayectoria GPS.

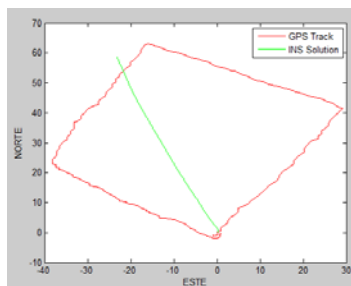


Figura 16 Trayectoria INS vs GPS

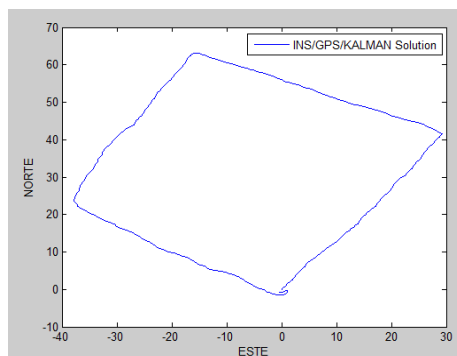


Figura 17 Trayectoria GPS/INS/Kalman.

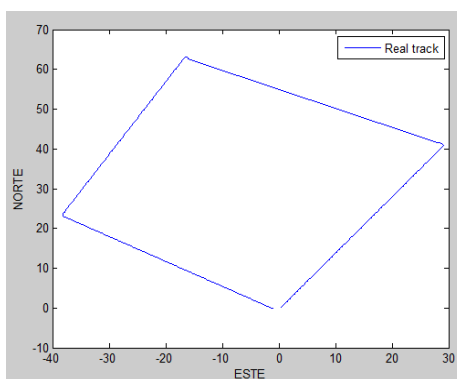


Figura 18 Trayectoria Real.

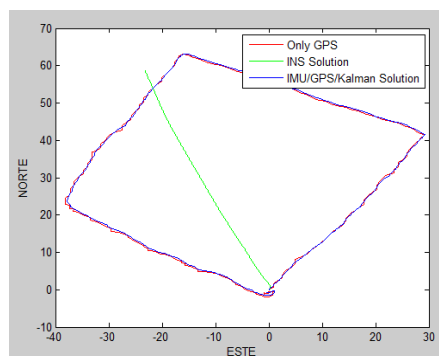


Figura 19 Trayectoria INS vs GPS vs GPS/INS/Kalman.

## 8. Resultados

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que es posible aplicar una fusión de datos de sistemas GPS/IMU de bajo costo utilizando un filtro de kalman para lograr reducir el error de posición de un GPS comercial con hasta 13 cm



(3.03%). Con lo que se comprueba que es posible reducir el error de un GPS mediante sensores inerciales MEMS.

## 9. Conclusiones

Cabe mencionar que aunque se obtuvieron resultados aceptables a pesar de utilizar sensores económicos, es necesario tomar en cuenta que tanto a la IMU como al GPS le afectan perturbaciones diferentes debido a la naturaleza y funcionamiento de cada uno, por eso dentro de las posibles mejoras al trabajo se debe considerar una caracterización y modelado de los errores propios de cada sensor para obtener un mejor desempeño del algoritmo, así como considerar etapas de pre filtrado antes de introducir los datos al sistema, además de la utilización de dispositivos más precisos. Estos dispositivos podrían ser un GPS de tipo diferencial el cual cuenta con un menor error de posición respecto a los receptores GPS comerciales, otro dispositivo para mejorar sería una IMU de más grados de libertad que involucre el uso de magnetómetros, barómetros, entre otros, lo que aumenta la información disponible del objeto. Dentro de estas mejoras se encuentra también el uso de transmisores de radio frecuencia para poder montar nuestro sistema GPS/IMU a vehículos aéreos no tripulados o DRONES, y vehículos terrestres sin la necesidad de tener una conexión por cable.

## 10. Referencias

- [1] Sistemas GNSS: Funcionamiento, Posición y Cartografía. Laboratorio de Astronomía, Geodesia y Cartografía. España. 2009.
- [2] Y. Zhao, GPS/IMU Integrated System for Land Vehicle Navigation based on MEMS. 2011. Royal Institute of Technology. Stockholm Sweden.
- [3] V. Bistrovs, A. Kluga, "Distance Estimation Using Fusion of Navigation Data". *Electronics and Electrical Engineering*. Vol. 5. Num.101. 2010. pp. 1215-1392.
- [4] R. Munguia, "A GPS-aided Inertial Navigation System in Direct Configuration". *Journal of Applied Research and Technology*. Vol.12. No. 4. 2014. pp. 803-814.

- [5] S. Yashar Balazadegan, Md. Nurul Amin, "Comparison of Integrated GPS/IMU aided by Map Matching and Stand-alone GPS aided by Map Matching for Urban and Suburban Areas". Council of european geodetic surveyors (CLGE). 2013.
- [6] J.Dah-Jing, S. Jyun-Han, H. Chia-Sheng, Y. Kai-Lun, "Development of a strapdown inertial navigation system simulation platform". Journal of Marine Science and Technology. Vol. 22. No. 3. 2014. pp.381-391.
- [7] R. Amezcua Paredes, A. G. Pineda Salgado, Sistema de Referencial: Análisis de Funcionamiento, Fundamentos y Evolución. 2012 Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- [8] An Introduction to the Kalman Filter. University of North Carolina at Chapel Hill. EE.UU. 2001.
- [9] An Introduction to Inertial Navigation. University of Cambridge. England. 2007.
- [10] V. Kumar, Integration of Inertial Navigation System and Global Positioning System Using Kalman Filter. 2004. Indian Institute of Technology. Bombay.
- [11] G. Ferrer Mínguez, Integración Kalman de Sensores Inerciales INS con GPS en un UAV. Universidad Politécnica de Cataluña. 2009. España.
- [12] F. Outamazirt, L. Fu, L. Yan, A. Nemra, "Autonomous navigation system using a fuzzy adaptive nonlinear  $H^\infty$  filter". Sensors. 14. 2014. pp.17600-17620.
- [13] B. L. Martínez Jiménez, L. M. Pineda Bombino, M. E. Martínez Carmenate, D. De Ávila Rodríguez, L. Hernández Santana, "Identificación de un vehículo aéreo no tripulado". SciELO. Vol. 33. No. 1. 2012
- [14] NY PLATAFORM. <http://www.nyplatform.com>. Mayo de 2016.
- [15] 5 HERTZ ELECTRONICA. <http://5hertz.com>. Mayo de 2016.
- [16] A. Nawrat, K. Jedrasiak, K. Daniec, R. Koterak, Inertial Navigation Systems and Its Practical Applications. INTECH. 2012. Gliwice, Poland.

## **11. Autores**

Ing. Luis Francisco Dávila Araiza obtuvo el grado de Ingeniero en Mecatrónica por la universidad Politécnica de Zacatecas en 2012. Actualmente se encuentra cursando el último semestre de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Autónoma de Zacatecas en la especialidad de Procesamiento Digital De Señales y Mecatrónica. Su línea actual de investigación actual es la navegación GPS así como la navegación y orientación mediante sensores inerciales.

Ph.D Efrén González Ramírez Es ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado de la Universidad de Guanajuato en el año de 1999. Obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica con especialidad Procesamiento Digital de Señales (PDS) en junio de 2000, también por parte de la Universidad de Guanajuato. Posteriormente obtiene el grado de Doctor en Filosofía con especialidad en Procesamiento de Señales de Radares Climatológicos el año 2005, por parte de la Universidad de Bristol, en Bristol, Reino Unido.

Ph.D. José Ismael de la Rosa Vargas obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Procesamiento de Señales y Control (noviembre de 2002), por parte de la Universidad Paris Sud (XI) y de la Escuela Superior de Electricidad (SUPELEC) al sur de Paris (Gif-sur-Yvette), Francia. Trabaja actualmente en procesamiento de imágenes y voz, métodos estocásticos en problemas inversos e instrumentación.

Ph.D José de Jesús Villa Hernández Es ingeniero en Comunicaciones y Electrónica egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas en el año de 1993. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias (Doctorado directo) con especialidad en Óptica y Procesamiento de Imágenes por parte del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y la Universidad Autónoma de Guanajuato, en 1999. Posteriormente, realizo una estancia pos-doctoral de un año en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), en Madrid, España en 2002.

# DISEÑO DE UNA SIMULACIÓN PARA CONOCER EL DESEMPEÑO DE UN SISTEMA CELULAR OFDMA

***Olivia Guerrero Méndez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*oliviagm801@hotmail.com*

***Josefina Castañeda Camacho***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*josefinacastaneda@yahoo.com.mx*

***Liliana Cortez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*cliliana23@gmail.com*

## **Resumen**

Este trabajo aborda una manera de conocer el desempeño de una red celular móvil de cuarta generación basada en OFDMA. La simulación que se presenta es realizada con el software MATLAB y está basada en la metodología Monte Carlo para eventos discretos. Los principales factores indicadores del desempeño de una red de este tipo son la SIR (Relación Señal a Interferencia), tasa de transmisión y *throughput*, los cuales en conjunto ofrecen una visión global del desempeño máximo alcanzable para estas redes donde dicho desempeño se mide en bits por segundo (bps).

**Palabra(s) Clave(s):** Cuarta generación, desempeño, OFDMA, simulación Monte Carlo, sistema celular.

## **1. Introducción**

La telefonía móvil es un área que continúa en desarrollo con el paso del tiempo, pues actualmente podemos decir que la evolución ha sido tal que la generación más reciente (4G) ofrece más y mejores características en comparación con las

generaciones predecesoras, entre estas características podemos mencionar que ofrece una comunicación rápida y fluida, velocidades mayores a 2Mbps, mayor seguridad, entre otras; es decir no está limitada a ofrecer únicamente el servicio de voz [1,2].

Haciendo un recuento de las diferentes generaciones de telefonía móvil podemos resumirlo de la siguiente manera:

- **Primera generación (1G):** Comenzó a funcionar a principios de los años ochenta y su característica principal es que utilizaba esquemas de modulación analógicos para la transmisión de voz; de hecho los sistemas móviles de esta generación realizaban la transmisión analógica de voz con baja calidad, con una velocidad de 2400 baudios y utilizaba para su funcionamiento la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA), por lo que estos sistemas estaban limitados en relación al número de usuarios a los que podían dar servicio [3,4].
- **Segunda generación (2G):** Esta generación comenzó aproximadamente en 1990, y a diferencia de 1G ya es digital, gracias a esto se lograron reducciones en cuanto a tamaño, costo y consumo de potencia en los dispositivos móviles, además de que se introdujeron nuevos servicios como los SMS (Short Message Service) y el identificador de llamadas. Se logró una velocidad de 9.6kbits/s, velocidad más alta respecto a 1G, pero muy limitada para la comunicación de datos. En esta generación se tuvieron avances significativos en términos de seguridad, calidad de voz y *roaming*. Las tecnologías predominantes desarrolladas para esta generación son: GSM, TDMA IS-136, CDMA IS-95 [4,5].
- **Tercera generación (3G):** La tercera generación se caracteriza por la convergencia de voz y datos con acceso inalámbrico a Internet, aplicaciones multimedia y altas transmisiones de datos. Los protocolos que se emplearon en estos sistemas tienen la capacidad de soportar velocidades más altas de información y están enfocados no solo en aplicaciones de voz sino de audio, video en movimiento, videoconferencia, acceso rápido a internet entre otros. En esta tercera generación los

sistemas están basados en UMTS, CDMA 2000, IMT-2000, ARIB (3GPP), UWC-136, entre otras [4,6]. Entre las características más importantes de 3G se pueden mencionar:

- ✓ Transmisión simétrica y asimétrica confiable.
  - ✓ Velocidades de 384 kbps en espacios abiertos y de hasta 2 Mbps para usuarios con baja movilidad (transeúntes que se desplazan a menos de 10 km/h).
  - ✓ Uso de ancho de banda dinámico de acuerdo a la aplicación.
  - ✓ Soporte de conmutación de paquetes y de circuitos
  - ✓ Acceso a Internet incluyendo todos sus servicios como audio y video
  - ✓ Diferentes servicios simultáneos por medio de una sola conexión
  - ✓ Mayor capacidad y uso eficiente del espectro radioeléctrico debido al uso de CDMA, SCDMA, etc.
  - ✓ Cobertura mundial con servicios terrestres y por satélite.
- **Cuarta generación (4G):** Esta generación fusiona tecnologías y protocolos ya existentes obteniendo como resultado un rendimiento más alto, 4G pretende consolidar los sistemas de tal forma que el usuario tenga un servicio estable y sin interrupciones en cualquier parte del mundo con el mismo dispositivo móvil; además se tiene un incremento en la velocidad respecto a las generaciones anteriores, lo que sin duda permitirá ofrecer mayores servicios y facilidades. 4G está basada completamente en el protocolo IP, se dice que es un sistema que engloba a otros sistemas y una red de redes que se alcanza gracias a la convergencia entre las redes de cables y las redes inalámbricas. Teóricamente 4G tiene la capacidad de proveer velocidades de acceso mayores a 100 Mbps en movimiento. 4G mantiene una calidad de servicio de punto a punto que incluye seguridad y con el mínimo costo posible. Así, es posible resumir las principales características de 4G de la siguiente manera [7-9]:
    - ✓ Compatibilidad de servicios con las redes móviles y las redes fijas
    - ✓ Alta calidad en los servicios móviles, respecto a todas las generaciones anteriores (1G-3G)

- ✓ Gran cobertura y simplicidad del roaming entre sistemas
- ✓ Sistema de múltiples antenas MIMO (Múltiples Entradas, Múltiples Salidas)
- ✓ Antenas inteligentes, que son capaces de suprimir las señales no deseadas y autoajustar la ganancia, además de incluir algoritmos para el procesamiento de señales.

La evolución de los sistemas celulares como se ha podido ver ha permitido el desarrollo de más y mejores características ofreciendo al usuario una comunicación en casi cualquier lugar y en cualquier momento.

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2 se explica la forma de funcionamiento de un sistema OFDMA, en la sección 3 se presenta el diseño de la simulación así como las ecuaciones del sistema, en la sección 4 se muestran los resultados a los que se llegaron tras haber implementado la simulación, en la sección 5 se presentan las conclusiones y finalmente en la sección 6 se encuentran las referencias utilizadas en este trabajo.

## **2. Sistema OFDMA**

Los sistemas celulares móviles de cuarta generación están basados en OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales), lo que implica que el ancho de banda es repartido en varios grupos de subportadoras, cada uno de estos grupos se denomina subcanal. Cada usuario puede ocupar uno o más subcanales; es posible asignar un número diferente de subportadoras a cada uno de los usuarios, de esta manera se logra una calidad de servicio diferente para cada uno de los usuarios y esto se determina en función del ancho de banda asignado. En OFDMA varios usuarios pueden transmitir datos simultáneamente a través de diferentes subcanales además de que OFDMA presenta un mecanismo de asignación flexible que hace posible asignar subportadoras dinámicamente dependiendo del tráfico mientras distintos tipos de modulación y potencias de transmisión son aplicados para tener una mejor utilización del espectro [10].

El sistema OFDMA que se emplea en la simulación tiene un ancho de banda de 10 MHz y cuenta con 1024 subportadoras, el número de usuarios es variable pero se considera un límite máximo de 50 mil usuarios para poder realizar las estimaciones necesarias, se consideran también 3 modulaciones para el sistema OFDMA que son QPSK, 16-QAM, 64-QAM, se utilizan antenas sectoriales y se hace el análisis del enlace descendente (estación base a usuario) pues se considera a este como el enlace limitante.

En un sistema OFDMA la cobertura es considerada como uno de los factores más importantes, es decir para los sistemas inalámbricos móviles de banda ancha satisfacer el requerimiento de cobertura significa que el enlace debe cumplir con una cierta SIR requerida además que las estaciones base deben entregar la potencia suficiente dentro del área de cobertura para que cada receptor en el sistema no experimente una interferencia excesiva [10].

El análisis del desempeño para sistemas OFDMA se realiza mediante factores indicadores tales la SIR,  $E_b/I_0$ , BER (*Bit Error Rate*, Tasa de Error de Bits), *Throughput* (Máxima tasa de bits), entre otros. En [10-15] se muestran algunos análisis hechos a sistemas de este tipo en los cuales es posible observar gráficas que muestran el desempeño en términos de las métricas ya mencionadas.

### **3. Diseño de la simulación**

Para este trabajo se emplea una simulación de eventos discretos basada en la metodología Monte Carlo, dicha metodología se basa en el muestreo sistemático de variables aleatorias. Los métodos Monte Carlo abarcan una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. Con este tipo de simulación se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios. El método Monte Carlo es una manera de dar solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. La simulación Monte Carlo es utilizada para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, de esta



manera se resuelven ciertos problemas estocásticos y determinísticos donde el tiempo no juega un papel importante [16,17].

En la simulación que se realizó cada usuario generado es considerado un evento y puesto que la simulación está basada en la metodología Monte Carlo en las ecuaciones del sistema OFDMA se utilizan variables aleatorias para modelar los efectos del sistema.

Para tener una idea más clara del planteamiento de la simulación, en la figura 1 se muestra el diagrama de flujo empleado para la implementación de dicha simulación. El primer paso consiste en generar de manera gráfica en MATLAB la red celular, que consiste en 37 celdas hexagonales, donde en la celda central es donde se generan los  $n$  usuarios aleatorios con distribución uniforme, este modelo de red se muestra en la figura 2. Las estaciones base están colocadas en el centro de cada una de las celdas y se consideran antenas sectoriales cada  $120^\circ$ .

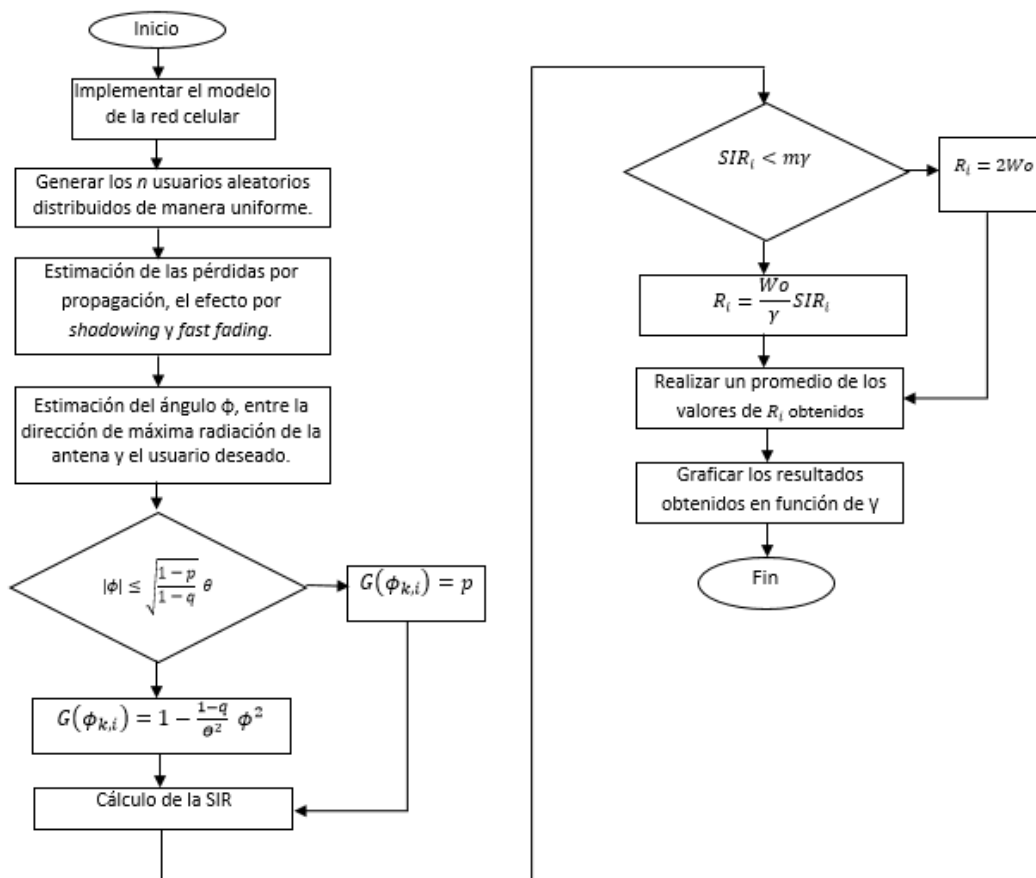


Figura 1 Diagrama de flujo para la simulación.

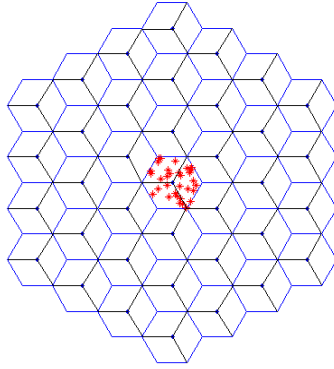


Figura 2 Modelo de la red celular.

Posteriormente se hace la estimación de las pérdidas por propagación, efectos por *shadowing* (oscurecimientos) y *fast fading* (caídas rápidas). Una vez realizadas estas estimaciones se hace el cálculo para poder conocer la ganancia de la antena y de acuerdo con esto poder calcular la SIR de cada usuario y poder asignar la tasa de transmisión que está en función de la modulación empleada (QPSK, 16-QAM, 64-QAM).

Finalmente se hace un promedio de los valores de  $R_i$  (tasa de transmisión de bits) para poder obtener los resultados en función de  $\gamma$  para posteriormente poder observar el comportamiento de la máxima tasa de transmisión.

Un paso muy importante en la simulación es la implementación de las ecuaciones que describen el sistema pues es por medio de ellas que se modelan los efectos del sistema ya mencionados como las pérdidas por trayecto, pérdidas por oscurecimientos, caídas rápidas, la ganancia de la antena, etc. y es posible determinar la máxima tasa de bits que puede ser alcanzada, es decir poder observar los factores indicadores del desempeño y de acuerdo con esto poder realizar un análisis acerca del sistema OFDMA. Es por ello que en la siguiente sección se explican cada una de las ecuaciones que utilizaron para la simulación.

### **Ecuaciones del sistema OFDMA**

Un sistema celular de cuarta generación basado en OFDMA es modelado a través de ecuaciones que describen el funcionamiento del sistema y gracias a las cuales es posible conocer su desempeño.

## Energía de bit a densidad espectral de interferencia

En la ecuación 1 se describe la relación de la energía de bit a densidad espectral de interferencia [18] y se define mediante ecuación 1.

$$\gamma = \left( \frac{E_b}{I_0} \right)_i = \frac{W_0}{R_i} SIR_i \quad (1)$$

Donde:

$SIR_i$  Relación Señal a Interferencia del i-ésimo usuario

$R_i$  Tasa de transmisión del i-ésimo usuario

$W_0$  Ancho de banda

## Tasa de transmisión

Partiendo de la ecuación 1 se obtiene la ecuación para la tasa de transmisión [10, 11,18] y queda definida, ecuación 2:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < m\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq m\gamma \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

$\gamma$  Relación energía de bit a interferencia

$m$  Dimensionalidad de la modulación empleada.

$m$  toma los valores de 2, 4 y 6 cuando es Q-PSK, 16-QAM y 64-QAM.

En OFDMA se utilizan tres tipos de modulaciones que son QPSK, 16-QAM y 64-QAM [10-12]. Por lo que se tienen entonces tres casos para  $R_i$  y son los siguientes:

- Cuando el sistema emplea una modulación tipo QPSK, la ecuación de  $R_i$  queda descrita como se muestra en la ecuación 3:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 2\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 2\gamma \end{cases} \quad (3)$$

- Si el sistema emplea una modulación tipo 16-QAM se tiene que  $R_i$  es descrito en la ecuación 4:

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 4\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 4\gamma \end{cases} \quad (4)$$

- Mientras que si se emplea una modulación 64-QAM  $R_i$  queda acotada mediante ecuación 5.

$$R_i = \begin{cases} (W_0/\gamma)SIR_i & \text{si } SIR_i < 6\gamma \\ 2W_0 & \text{si } SIR_i \geq 6\gamma \end{cases} \quad (5)$$

## SIR

La ecuación de la SIR es muy importante puesto que como se verá es de este parámetro que depende la tasa de transmisión para cada uno de los usuarios. La SIR por definición es el cociente de la potencia recibida entre la interferencia recibida para el  $i$ -ésimo usuario [10, 18] y para un sistema OFDMA queda descrita según se muestra en la ecuación 6.

$$SIR_i = \frac{G(\phi_{0,i})u_{\ell}^{0,i}/r_{0,i}^{\mu} 10^{\zeta_{0,i}/10}}{\sum_{k=1}^{N_{BS}} G(\phi_{k,i})u_{\ell}^{k,i}/r_{k,i}^{\mu} 10^{\zeta_{k,i}/10}} \quad (6)$$

Donde:

- $G(\phi)$ , es la ganancia de la antena del  $i$ -ésimo usuario respecto a estación base.
- $u_{\ell}$ , pérdidas causadas por fast fading (caídas rápidas) para el  $i$ -ésimo usuario y son modeladas con variables aleatorias tipo Rayleigh.
- $r_i^{\mu} 10^{\zeta_i/10}$ , pérdidas por propagación para el  $i$ -ésimo usuario respecto a la estación base, este tipo de pérdidas son dadas por el producto de la  $\mu$ -ésima potencia de la distancia  $r$  (distancia entre el usuario de interés y la estación base) y una componente log-normal  $10^{\zeta_i/10}$  que representa las pérdidas por shadowing (oscurecimientos) cuyas características están en función de la variable aleatoria Gaussiana  $\zeta$  con media cero y desviación estándar  $\Delta$ .

En la ecuación 6 es importante mencionar que se utiliza el subíndice cero en el numerador es para indicar que estamos hablando de la estación base cero

ubicada en la celda central, es decir la celda en donde se están generando los usuarios mientras que el denominador nos indica las estaciones base interferentes.

### Ganancia de la antena

La ecuación 7 describe la ganancia de la antena y es una de las ecuaciones más importantes en un sistema OFDMA, en este caso se emplearon antenas sectoriales, es decir se utilizan antenas con una cobertura de 120° para cubrir los tres sectores de cada una de las celdas [18].

$$G(\phi_{k,i}) = \begin{cases} 1 - \frac{1-q}{\theta^2} \phi^2 & \text{si } |\phi_{k,i}| \leq \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \\ p & \text{si } |\phi_{k,i}| > \sqrt{\frac{1-p}{1-q}} \theta \end{cases} \quad (7)$$

Donde:

“ $\phi$ ” Ángulo entre el usuario de interés y la dirección de máxima ganancia de la antena.

“ $q$ ” Representa el nivel de ganancia a  $\theta$  radianes desde el cruce de un sector a la dirección de máxima ganancia

“ $p$ ” Representa el nivel de ganancia promedio normalizada para el lóbulo lateral.

## 4. Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a través de la simulación, es importante decir que los resultados obtenidos están clasificados en términos de las modulaciones empleadas. En estos resultados se están considerando dos casos: en primer lugar se considera que únicamente se utiliza un bloque de frecuencia en los tres sectores de cada celda y en segundo lugar se considera que cada uno de los sectores utiliza un bloque de frecuencia diferente, es decir se cuenta con tres bloques de frecuencia por celda.

En la figura 3 se muestra el modelo de red en donde cada celda se encuentra dividida en tres sectores y se utiliza el mismo bloque de frecuencia en cada uno de ellos.

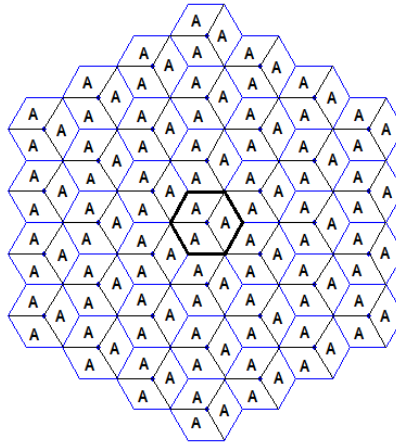


Figura 3 Modelo de red celular considerando un bloque de frecuencia.

El desempeño para este caso se muestra en la figura 4 donde es posible apreciar los resultados en términos de *throughput* que se define como la máxima tasa de transmisión, y están en términos de bits por segundo.

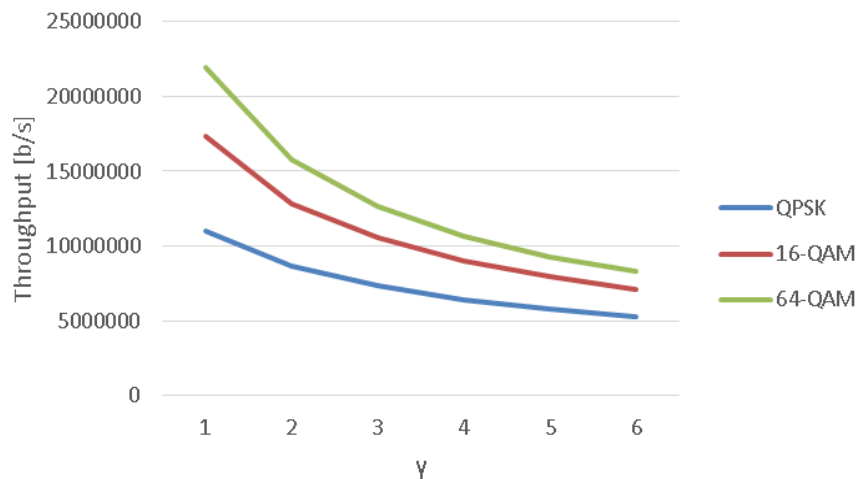


Figura 4 *Throughput* obtenido considerando un bloque de frecuencia.

Al considerar tres bloques de frecuencia, es conveniente mencionar que la comparación de los resultados se hace tomando como referencia uno de los sectores de la celda central (A, B, C) de tal forma que los sectores interferentes a considerar serán únicamente los sectores interferentes etiquetados con la misma letra de sector (A, B, C). En la figura 5 se muestra el modelo de la red celular tomando en cuenta esta consideración.

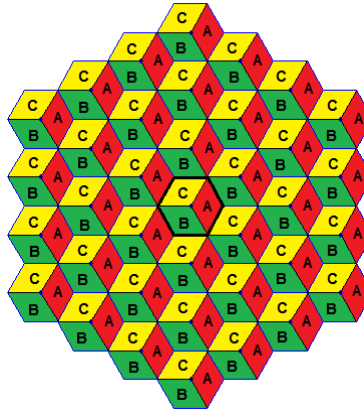


Figura 5 Modelo de la red celular con tres bloques de frecuencia.

Empleando el modelo de la red celular presentado en la figura 5, se obtienen los resultados en cuanto al desempeño del sistema (figura 6).

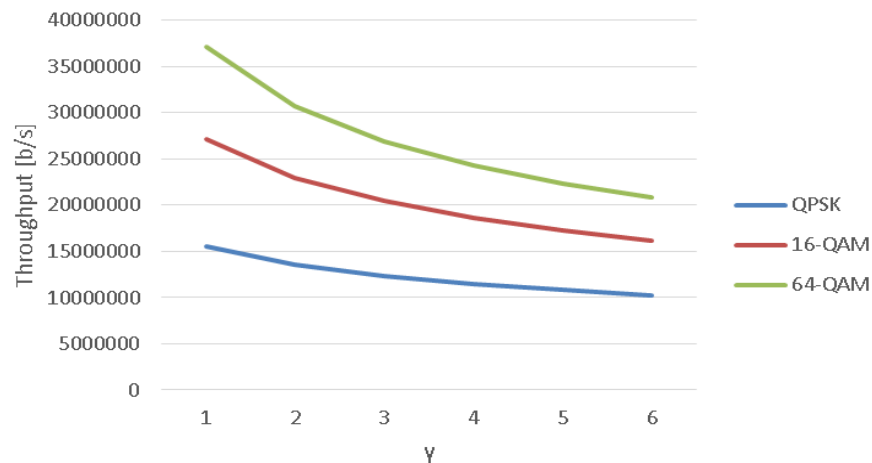


Figura 6 *Throughput* obtenido al considerar tres bloques de frecuencia.

Cuando se emplean tres bloques de frecuencia, es importante notar que debido a la distribución uniforme de los usuarios, el desempeño obtenido para un sector en particular, será muy similar al desempeño obtenido en los dos sectores restantes. Esta comparación se muestra en la tabla 1.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con los resultados mostrados en la sección anterior el desempeño de una red celular de este tipo depende en gran medida del tipo de modulación

empleado, pues es posible observar que el mayor desempeño se logró con la modulación 64-QAM donde se alcanzaron como máximo 21.96 Mbps y como mínimo 8.27 Mbps, en segundo lugar se encuentra la modulación 16-QAM donde el valor máximo quedó establecido en 17.3 Mbps y como mínimo 7.1 Mbps y finalmente con la modulación Q-PSK es con la que se alcanzaron valores más pequeños puesto que como máximo se lograron 11.03 Mbps como máximo y como mínimo se alcanzaron 5.26 Mbps, todos estos valores son para el caso cuando se utiliza el mismo bloque de frecuencia en cada uno de los tres sectores de la celda.

Tabla 1. Comparación entre el desempeño al considerar tres bloques de frecuencia.

Modulación y sector	Throughput (b/s)					
	$\gamma=1$	$\gamma=2$	$\gamma=3$	$\gamma=4$	$\gamma=5$	$\gamma=6$
QPSK, sector A	15,501,967.78	13,604,964.37	12,391,380.23	11,498,877.64	10,797,756.72	10,223,986.75
16-QAM, sector A	27,209,928.74	22,997,755.28	20,447,973.49	18,641,789.25	17,276,152.34	16,192,233.40
64-QAM, sector A	37,174,140.70	30,671,960.24	26,874,137.54	24,288,350.10	22,350,129.35	20,822,201.19
QPSK, sector B	15,517,368.09	13,663,465.46	12,450,538.38	11,555,085.63	10,851,656.07	10,280,816.29
16-QAM, sector B	27,326,930.91	23,110,171.27	20,561,632.58	18,779,499.28	17,414,442.88	16,320,334.61
64-QAM, sector B	37,351,615.13	30,842,448.87	27,085,703.66	24,480,501.91	22,526,353.47	20,978,445.70
QPSK, sector C	15,500,413.23	13,633,160.34	12,439,350.10	11,560,165.80	10,867,256.68	10,297,952.16
16-QAM, sector C	27,266,320.69	23,120,331.60	20,595,904.32	18,805,981.88	17,435,222.84	16,335,157.51
64-QAM, sector C	37,318,050.30	30,893,856.48	27,119,451.02	24,502,736.26	22,529,959.00	20,961,935.10

Cuando se utilizan tres bloques de frecuencia el desempeño del sistema aumenta pues ahora se tiene que para el caso de la modulación 64-QAM se alcanzan como máximo 37.3 Mbps y como mínimo 20.96 Mbps, para el caso de la modulación 16-QAM se alcanza un valor máximo de 27.2 Mbps y como mínimo 16.3 Mbps y finalmente para el caso de la modulación QPSK se alcanzó como máximo 15.5 Mbps y como mínimo 10.2 Mbps.

Hablando en términos de promedio para el caso en que se utilizó un solo bloque de frecuencia se obtiene en promedio se obtuvieron 13.11 Mbps para el caso de la modulación 64-QAM, para 16-QAM se obtuvieron 10.79 Mbps y para QPSK se obtuvieron solamente 7.41 Mbps. Mientras que al utilizar tres bloques de frecuencia se alcanzaron valores promedio mucho más altos, pues con la



modulación 64-QAM se obtuvieron 27.22 Mbps, con la modulación 16-QAM se alcanzaron 20.50 Mbps y con la modulación QPSK se obtuvieron 12.38 Mbps.

Sin embargo, es importante decir que todos los valores obtenidos por medio de esta simulación sufren de un cierto nivel de degradación entre el valor máximo obtenido y el valor mínimo al que decaen. En los resultados mostrados anteriormente fue posible observar que el nivel de degradación sufrido por el sistema es mucho mayor con la modulación 64-QAM, en segundo lugar se encuentra la modulación 16-QAM y finalmente la modulación QPSK la cual tiene el menor nivel de degradación, es decir mantiene sus niveles de *throughput* con menor variación en comparación con las otras dos modulaciones.

Finalmente es conveniente agregar que la simulación presentada en este trabajo ofrece resultados del desempeño global para un sistema celular basado en OFDMA; en esta simulación se considera a cada usuario como un evento, puesto que como se mencionó es una simulación de eventos discretos basada en la metodología Monte Carlo. Con esta simulación es posible ofrecer una buena perspectiva del desempeño de este tipo de redes en términos de la máxima tasa de transmisión.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] R. Esmailzadeh. M, Nakagawa, "TDD-CDMA for the 4th Generation of Wireless Communications". IEEE Wireless Commun. 2003.
- [2] T. S. Rappaport, Wireless Communications. Principles and Practice. 2a Ed. 2002. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ. 2002.
- [3] D. Muñoz Rodríguez, Sistemas Inalámbricos de comunicación personal. 2002. Marcombo.
- [4] O. Rodríguez Gamez, R. Hernández Perdomo, "Telefonía móvil celular: origen, evolución, perspectivas". Red de Revistas científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. Vol. XI. núm.1. enero-marzo 2005.
- [5] C. M. De Bernardo González, T. Priede Bergamini, Marketing móvil: una nueva herramienta de comunicación. 2007. Netbiblio.

- [6] J. Ghe Voinea, *Redes de Comunicaciones. Administración y Gestión*, Fylred Radiocomunicaciones. 2012.
- [7] J.J Cárdenas Páez, José Joel, *Seminario de Titulación, Procesamiento Digital de Señales, Redes de Comunicación 4G WiMAX*. 2009. Instituto Politécnico Nacional.
- [8] *Tecnología 4G*. <http://www.ecured.cu/index.php/Tecnología4G>. Marzo de 2016.
- [9] *Redes Wimax*. <http://www.ecured.cu/index.php/WiMAX>. Marzo de 2016.
- [10] S. Yang, *OFDMA System Analysis and Design*. Artech House. USA. 2010. 319 págs.
- [11] J. Bae Park, Y. J. Sang, Seong-Lyun Kim, K. Soon Kim. "Adaptative Inter-cell interference management for downlink FH-OFDMA systems". Yonsei University, Shinchon Dong, Seodaemun Gu, Seoul. 2008. Korea.
- [12] Zheng Xie and Bernhard Walke. "Frequency Reuse Techniques for Attaining both Coverage and High Spectral Efficiency in OFDMA Cellular Systems". Chair of Communication Networks (ComNets) RWTH Aachen University Aachen, Germany, 2010.
- [13] H. Jia, "On the Performance of IEEE 802.16 OFDMA System under different Frequency Reuse and Subcarrier Permutation Patterns". IEEE International Conference on Communications. June 2007.
- [14] M. S. Al-Janabi, C. Charalampos, Tsimenides, S. Bayan, Sharif, Y. Stéphane, Le Goff, "Simulated and Semi-Analytical Throughput Evaluation for AMC- OFDMA Systems". School of Electrical, Electronics and Computer Engineering Newcastle University, Merz Court. UK. 2010.
- [15] B. Mathewos Hambebo, M. M. Carvalho, F. M. Ham, "Performance Evaluation of Static Frequency Reuse Techniques for OFDMA Cellular Networks". Florida Institute of Technology. 2014.
- [16] *Simulación Método Monte Carlo*. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional del Centro de la Pcia de Buenos Aires. Curso de Investigación Operativa I.

- [17] P. Kroese, Dirk. Taimre, Thomas. I. Botev, Zdravko. "Handbook of Monte Carlo Methods". Wiley Series in Probability and Statistics. United States of America, 2011. 775 págs.
- [18] J. Castañeda-Camacho, G. Mino-Aguilar, L. Cortez, J. E. M. Gutiérrez Arias, J. F. Guerrero-Castellanos, G. A. Muñoz-Hernández, "A Monte Carlo Simulation Applied to Measurement of the impact of the smart antenna technology in digital celular systems". *Revista de Ingeniería Investigación y Tecnología UNAM*. volumen XVI. Número 2. Abril-junio 2015. ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

## **7. Autores**

Olivia Guerrero Méndez. Estudió la licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, actualmente es estudiante de la maestría en Ingeniería Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Dra. Josefina Castañeda Camacho. Es profesora investigadora de tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Imparte clases en licenciatura y a nivel posgrado.

Dra. Liliana Cortez. Es profesora investigadora de tiempo completo en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

# **ANTENA FRACTAL DE SIERPINSKI PARA OPERAR EN LAS BANDAS DE 900 MHZ Y 1.8 GHZ**

## ***Iván Rosendo González Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ivan.gonzalez.rangel@gmail.com*

## ***José Serrano Chávez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*joserranochavez@gmail.com*

## ***Javier Vargas Sánchez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*jvargass007@gmail.com*

## ***Genaro Hernández Valdez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ghv@correo.azc.uam.mx*

## ***Edgar Alejandro Andrade González***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*eaag@correo.azc.uam.mx*

## ***Mario Reyes Ayala***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mra@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Al utilizar la geometría fractal en el diseño de las antenas podemos obtener ciertas ventajas sobre las antenas tradicionales tales como la miniaturización, bajos costos, gran ancho de banda, aplicaciones multibanda, entre otras. En este artículo, se presenta una metodología de diseño para simular, construir y

caracterizar una antena fractal multibanda basada en la geometría de Sierpinski para trabajar en las bandas GSM de 900 MHz y 1.8 GHz. La antena diseñada se simula utilizando un software que permite analizar la estructura de la antena y aplicar métodos numéricos para calcular los parámetros más relevantes de la antena diseñada (parámetro  $s_{11}$ , patrón de radiación y ganancia en potencia en las frecuencias de interés). Una vez que la simulación arroja resultados satisfactorios, la antena fractal multibanda se construye sobre una placa de circuitos impresos y se caracteriza utilizando un analizador de espectros y un medidor de parámetros de antenas para obtener las pérdidas por retorno (parámetro  $s_{11}$ ), el patrón de radiación y la ganancia en potencia de la antena diseñada. La antena construida presenta resultados satisfactorios en las frecuencias de interés: el parámetro  $s_{11}$  resultó de -10.5 dB y -20 dB en las frecuencias de 900 MHz y 1.8 GHz, respectivamente.

**Palabra(s) Clave(s):** Antena fractal, antena multibanda, geometría de Sierpinski.

## 1. Introducción

Muchos de los dispositivos inalámbricos actuales requieren operar sobre múltiples bandas de frecuencia, lo cual resulta un reto en el diseño de antenas eficientes para este fin [1]-[2]. Los dispositivos móviles modernos deben operar en diferentes frecuencias para las comunicaciones móviles, por ejemplo, necesitan ser capaces por lo menos de trabajar en las bandas de 900MHz y 1.8GHz para GSM. En otros países como E.U.A. se utiliza también la banda de 1900MHz, otras bandas requeridas por estos dispositivos son la de 2.4GHz para bluetooth. Por estas razones resulta atractivo que una antena pueda trabajar en más de una banda [3].

Las antenas fractales nos proporcionan ciertas ventajas sobre las antenas tradicionales ya que utilizando la geometría fractal adecuada son capaces de permitir que un sistema de comunicación trabaje con diversas bandas de frecuencia con una sola antena, de otra forma sería necesario tener una antena para cada banda de frecuencia en la que el sistema necesite trabajar. Además, las antenas basadas en la geometría fractal permiten un diseño más compacto

que las antenas tradicionales [5]-[15]. Como se mencionó en el párrafo anterior, los sistemas de comunicación trabajan en más de una banda de frecuencia, especialmente los sistemas de comunicación móvil, podemos encontrar que trabajan con bandas GSM, 3G y actualmente 4G/LTE. Las antenas fractales permiten que se pueda radiar y captar en todos estos intervalos de frecuencia con una sola antena de un tamaño muy pequeño, de no ser así, los sistemas de comunicación móvil necesitarían una antena para cada intervalo de frecuencia.

Una antena fractal se crea a partir de una forma geométrica, repitiendo esta figura iterativamente dentro de una figura base, su diseño permite tener un mayor perímetro en un área determinada y como consecuencia reduce su tamaño. Las antenas fractales se pueden presentar con distintas geometrías tales como: el triángulo de Sierpinski basada en triángulos, repitiendo el triángulo base dentro de este mismo por  $N$  iteraciones, el copo de Koch que va intersectando otros triángulos y con algunas iteraciones toma la forma de un copo de nieve, fractales de árbol donde se divide un monopolo y cada separación de este también se divide y toma la forma de un árbol, entre otros.

En este trabajo se diseña, simula, construye y caracteriza una antena fractal basada en la geometría de Sierpinski para que opere en las bandas de comunicaciones móviles GSM de 900 MHz y 1.8 GHz.

## **2. Características de la geometría fractal de Sierpinski**

El triángulo de Sierpinski se forma con un triángulo inicial dentro del cual, en su primera iteración, se suprime un triángulo con dimensiones divididas por un factor de dos y rotado 180 grados, tal como se muestra en la segunda forma geométrica superior de la figura 1. Al suprimir este triángulo, al área del triángulo inicial se le resta  $\frac{3}{4}$  de área, esto se observa en la figura 1 quedando tres triángulos sombreados. Así, el área después de la primera iteración es  $A_1 = A_0 \frac{3}{4}$ , donde  $A_1$  es el área metálica de la primera iteración y  $A_0$  es el área del triángulo inicial. En una segunda iteración se repite el proceso en cada uno de los triángulos sombreados, se suprime un triángulo dividido por un factor de dos y rotado 180 grados, como esos triángulos sombreados forman parte del triángulo

inicial, el área suprimida se le resta al área del triángulo inicial, por lo que en una segunda iteración, el área eliminada es  $A_2 = A_0 \frac{3}{4} - 3 \frac{\frac{1}{4}A_0}{4} = A_0 \frac{9}{16} = A_0 \left(\frac{3}{4}\right)^2$  observando que para la iteración cero se tiene un solo triángulo, para la iteración 1 se tienen tres triángulos, para la iteración 2 se tienen 9 triángulos. En la figura 1 se puede apreciar que para la tercera iteración tenemos 27 triángulos, por lo que podemos concluir que el área del triángulo de Sierpinski es  $A_0 \left(\frac{3}{4}\right)^n$  donde  $n$  es el número de iteraciones con las cuales se forma la geometría de la antena fractal. Con esto se demuestra que al aumentar el número de iteraciones el área será más pequeña, si llevamos esto a un número muy grande de iteraciones el área será muy pequeña, de forma que al llevar el número de iteraciones al infinito el área será cero, esto se demuestra con la ecuación 1.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} A_k = A_0 \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{3}{4}\right)^k = A_0(0) = 0 \quad (1)$$

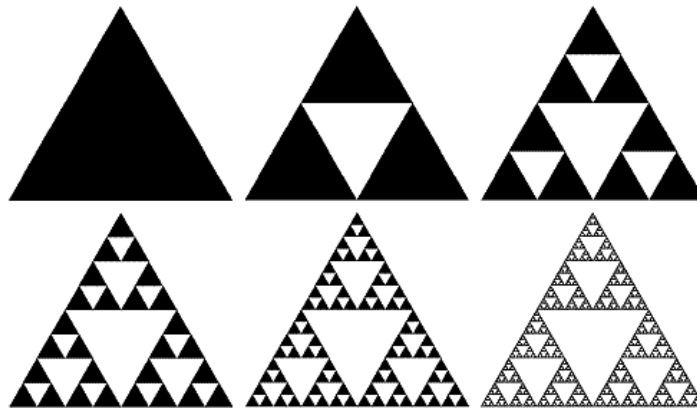


Figura 1 Triángulo de Sierpinski desde la iteración cero hasta la iteración cinco.

Por otra parte, para calcular el perímetro del triángulo de Sierpinski se debe tomar en cuenta que durante el proceso de incremento de iteraciones se eliminan fragmentos del triángulo inicial, quedando tres triángulos cada uno de ellos con la mitad del perímetro del triángulo inicial. En una primera iteración se tiene el siguiente perímetro  $P_1 = P_0(3/2)$  con  $P_0$  perímetro del triángulo inicial y  $P_1$  perímetro del triángulo en la primer iteración. En la segunda iteración tenemos  $3^2$  triángulos con un perímetro de tamaño  $P_0/4$ , entonces, en la segunda iteración

tenemos un perímetro  $P_2 = P_0(3/2)^2$ . Si analizamos el perímetro de los triángulos podemos observar que para la iteración cero se tiene un perímetro  $P_0 = P_0(3/2)^0$ , para la iteración uno se tiene un perímetro  $P_1 = P_0(3/2)^1$ , para la iteración dos se tiene un perímetro de  $P_2 = P_0(3/2)^2$ , por lo que se concluye que  $P_n = P_0(3/2)^n$ . Al llevar el número de iteraciones a infinito el perímetro del triángulo de Sierpinski, ecuación 2.

$$P_{n \rightarrow \infty} = \lim_{n \rightarrow \infty} P_0 \left(\frac{3}{2}\right)^n = \infty \quad (2)$$

### 3. Diseño y simulación de la antena fractal de Sierpinski

Algunas formas fractales tienen propiedades geométricas que permiten construir antenas con un comportamiento multibanda. Ciertas formas fractales son autosimilares. De forma intuitiva un objeto es autosimilar cuando está formado por copias de sí mismo a una escala más reducida. Un ejemplo de la geometría fractal autosimilar es el triángulo de Sierpinski, gracias a su propiedad de autosimilitud podemos deducir la ecuación de su periodo de operación que está dada por la ecuación 3 [10].

$$\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} \quad (3)$$

Donde  $n$  representa el número de iteración y  $h$  representa la altura del triángulo. En una antena tradicional el tamaño de una antena está directamente relacionado a la frecuencia (longitud de onda) de trabajo en la que opera, por lo que solo puede transmitir y recibir ondas de radio en la frecuencia para la cual está diseñada. Otra de las ventajas de utilizar la geometría fractal en el diseño de antenas es que la propiedad de autosimilitud les permite tener un comportamiento multibanda. En la figura 2 se puede observar que en una antena diseñada con la geometría fractal del triángulo de Sierpinski cada iteración representa la altura en un triángulo, esta altura está directamente relacionada con la frecuencia de trabajo de la antena. Como se mencionó anteriormente, con la propiedad de autosimilitud, estas antenas trabajan en múltiples bandas de frecuencia, las cuales están relacionadas con la altura de los triángulos. El



periodo de operación de una antena fractal diseñada con el triángulo de Sierpinski, con triángulos autosimilares con escalas de la mitad de su tamaño en la siguiente iteración es de  $\delta = \frac{h_n}{h_{n+1}} = 2$ , por lo que en cada iteración se espera que la antena opere en una frecuencia multiplicada por un factor de dos.

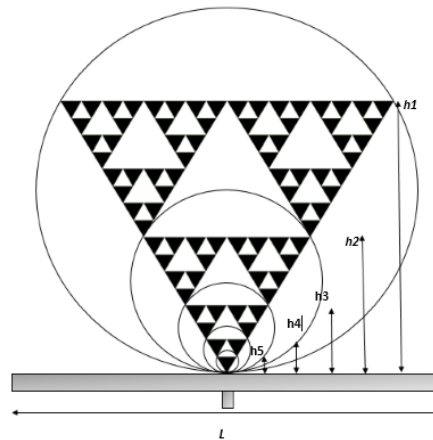


Figura 2 Diseño de una antena fractal con triángulo de Sierpinski.

Para la construcción de una antena fractal basada en el triángulo de Sierpinski el número de iteraciones está directamente relacionado con el número de bandas de frecuencia en las que va a operar. Sin embargo, el número de iteraciones no debería ser muy grande ya que al aumentar el número de iteraciones aumentará el perímetro en la antena y esto afecta a su efectividad ya que la intensidad de radiación decrece al incrementar el perímetro de la antena [10]. En el diseño de una antena de Sierpinski, la frecuencia de la iteración cero (frecuencia más baja) en la que la antena va a operar se calcula con la ecuación 4 [10]:

$$f \approx k \frac{c}{h} \quad (4)$$

Donde  $f$  es la frecuencia más baja en la que la antena opera,  $k$  es una constante que depende del tipo del sustrato utilizado,  $c$  es la velocidad de la luz al vacío y  $h$  es la altura del triángulo más grande de la antena.

La constante  $k$  tiene un valor que depende del tipo de sustrato y de las iteraciones utilizadas en la antena, se puede pensar que al tener un factor  $\delta = 2$

la antena opere en frecuencias con un factor de dos en cada una de sus iteraciones, sin embargo, esto no sucede de esta forma. Mediante un proceso de simulaciones se analizan diferentes tamaños para la antena fractal de Sierpinski con cinco iteraciones para encontrar la constante  $k$  al utilizar baquelita como sustrato para la antena y se determina el factor de operación entre cada una de sus iteraciones. El valor encontrado mediante las simulaciones para la constante  $k$  para este tipo de antenas es de 0.142 y se encuentra que se tiene un factor aproximado de 3.48 entre la primera y segunda iteración, 1.84 entre la segunda y tercer iteración, 1.56 entre la tercer y cuarta iteración, y 1.31 entre la cuarta y quinta iteración. Con estos resultados podemos observar que para la segunda y tercera iteración de esta antena tenemos un factor aproximado a dos, por lo que se simula de forma que la segunda iteración opere en 900 MHz. De esta forma, si el factor entre la primera y la segunda iteración es de 3.48 y la antena se diseña para que la segunda iteración opere en 900 MHz, la primera iteración debería operar en 258 MHz. Al tener un factor de 1.84 entre la segunda y la tercera iteración, la tercer iteración debería operar en 1.656 GHz.

Si la constante  $k$  tiene un valor de 0.142 y queremos que nuestra frecuencia más baja sea de 258 MHz, haciendo uso de la ecuación (4) obtenemos que la altura del triángulo más grande debiera ser de 17cm. Al simular y ajustar la altura obtenemos que una antena de Sierpinski con 16.5 cm de altura trabaja de forma aceptable para las bandas GSM, los resultados se observan en la tabla 1.

Tabla 1 Relación entre triángulos de Sierpinski en sus primeras tres iteraciones.

Iteración	Altura en centímetros	Frecuencia de resonancia en MHz
1	16.5	274
2	8.25	907
3	4.125	1734

La estructura de la antena fractal simulada se puede observar en la figura 3, para estas simulaciones se utilizó el software HFSS (High Frequency Structural Simulator) de ANSYS, herramienta de gran precisión para simulación de componentes de alta frecuencia que hace uso de elementos finitos para generar

los resultados de los efectos de la radiación en las estructuras construidas. En la figura 4 se muestra las pérdidas por retorno (parámetro  $s_{11}$ ) y las frecuencias de máximo acoplamiento de la antena, las cuales resultaron ser de 907 MHz y 1.73 GHz. Por otra parte, la figura 5 muestra el ancho de banda de la segunda y la tercera iteración de la antena. En la figura 5 se observa que para la segunda iteración de la antena tenemos un ancho de banda de 83 MHz (= 860 MHz - 943 MHz) y para la tercera iteración se tiene un ancho de banda de 499 MHz (=1573 MHz - 2072 MHz). Esta antena garantiza que opere en las bandas GSM ya que sus frecuencias de 900 MHz y 1.8 GHz están dentro del ancho de banda en el que opera la antena simulada.

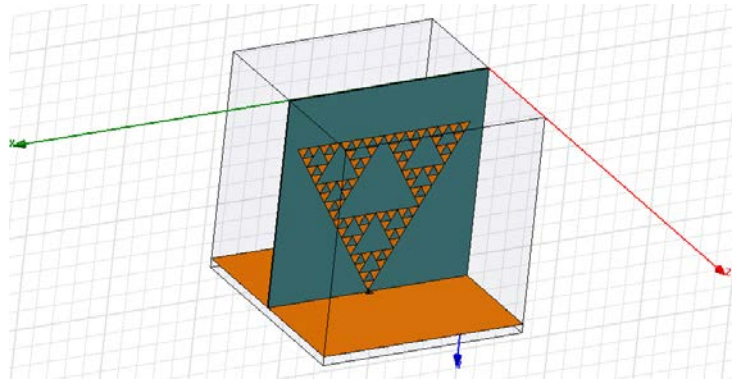


Figura 3 Simulación de la antena fractal de Sierpinski.

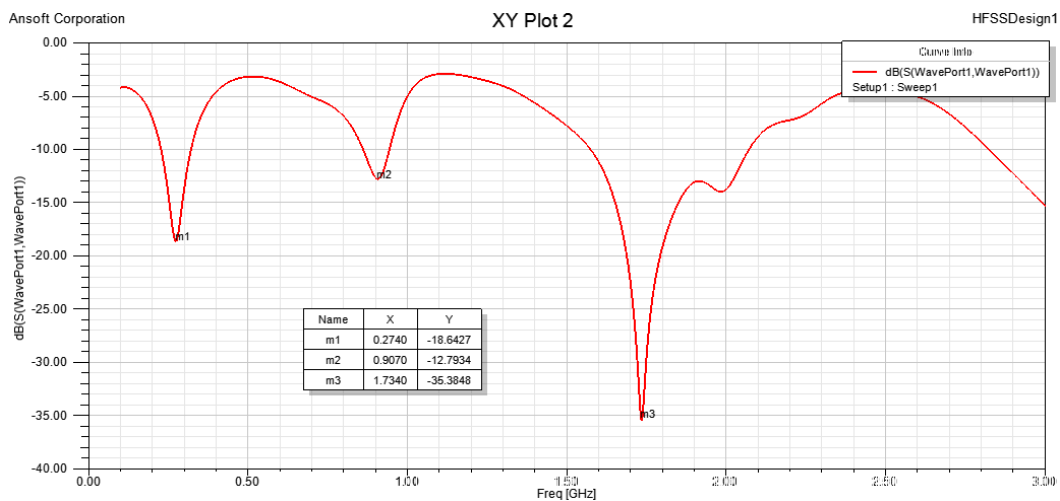


Figura 4 Simulación de una antena fractal de Sierpinski con altura de 16.5 cm.

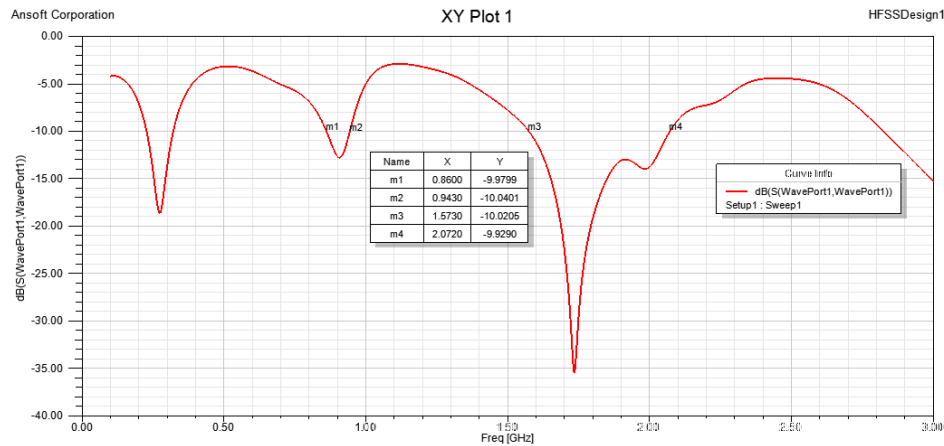


Figura 5 Simulación para que la antena fractal opere en frecuencias 900 y 1800MHz.

En la figura 6, se muestran los resultados de simulación del patrón de radiación de la antena obtenido para una frecuencia de operación de 900 MHz. En la figura 6, se observa que la antena fractal de Sierpinski logra una ganancia en potencia máxima de 3.45 dB.

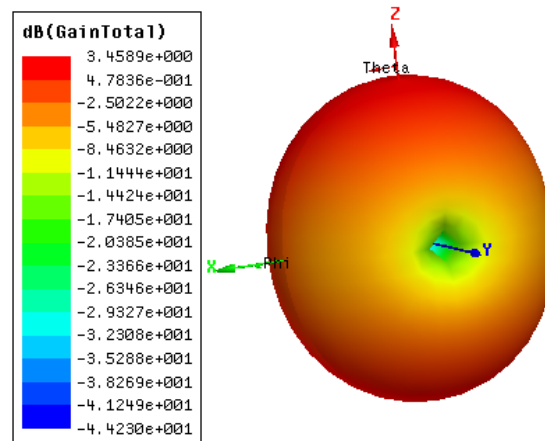


Figura 6 Patrón de radiación en el simulador.

Debido a que los resultados de simulación resultaron satisfactorios, se procedió a la construcción de la antena fractal de Sierpinski, la cual se fabricó con placas de circuito impreso de baquelita tal como se especificó en la simulación. Durante la construcción de la antena es importante asegurar que entre los triángulos que forman la antena exista continuidad de corriente. En figura 7 se puede observar la antena fractal de Sierpinsky construida.

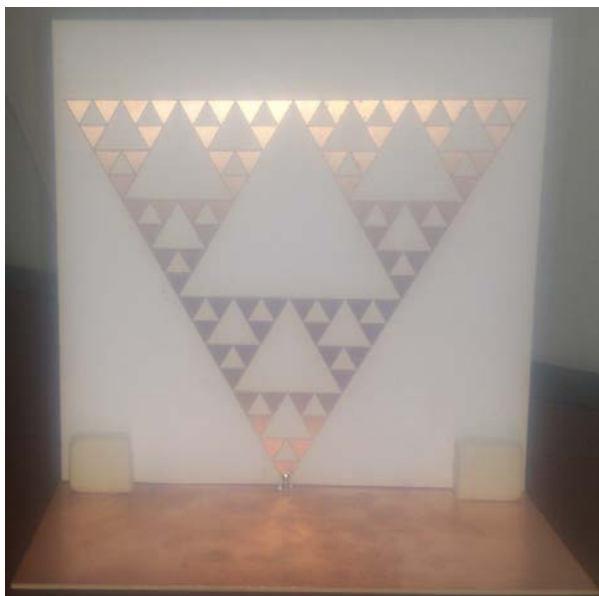


Figura 7 Antena fractal de Sierpinski multibanda.

#### **4. Resultados Experimentales**

La caracterización de la antena se realizó con un analizador de espectros Field RF Analyzer de keysight el cual es capaz de hacer mediciones desde los 200 MHz hasta los 6 GHz y un medidor de parámetros de antenas EMSCAN el cual posee un arreglo de sensores que miden el campo cercano de la antena y calculan el campo lejano. En la figura 8 se muestra el analizador conectado a la antena midiendo sus características experimentales.

En figura 9 se observan las múltiples frecuencias de acoplamiento de la antena construida. En particular, la figura 9 muestra que las pérdidas por retorno resultaron ser de 10.59 dB y 26.49 dB en las frecuencias de 901 MHz y 1.76 GHz, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por simulación reportados en la sección anterior. En figura 10, se muestra el ancho de banda medido de la segunda y de la tercer iteración. En particular, la figura 10 muestra que el ancho de banda es de 25 MHz y 260 MHz en la segunda y tercera iteración, respectivamente. La tabla 2 muestra un resumen de los resultados experimentales relacionados a las frecuencias de resonancia y los anchos de banda de la antena construida.

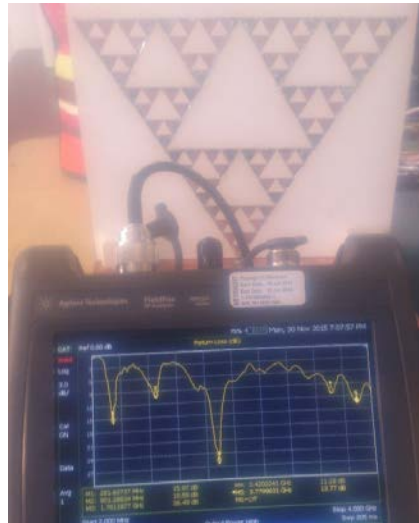


Figura 8 Analizador de cables y antenas midiendo el coeficiente de reflexión.



Figura 9 Frecuencias de resonancia medidas experimentalmente.



Figura 10 Ancho de banda experimental de la segunda y tercer iteraciones de la antena.

Tabla 2 Resultados experimentales 2ª y 3ª Iteración de la antena de Sierpinski.

Iteración	Altura en cm	Frecuencia de resonancia	Ancho de banda
2	8.25	901.28 MHz	24.8 MHz
3	4.125	1.76 GHz	260 MHz

Como parte de la caracterización de la antena desarrollada, se utilizó un medidor de parámetros de antenas, el cual conectado a un software y con el analizador de espectros, es capaz de recibir un barrido de frecuencia desde el analizador de espectros y a través de sensores mide el campo cercano generado por la antena y con esos datos genera los resultados para el campo lejano a través de métodos numéricos. El software utilizado con el medidor de parámetros de antenas nos proporciona el parámetro  $s_{11}$  de la antena, el cual se puede observar en la figura 11. También nos muestra el patrón de radiación, este se puede observar en la figura 12.

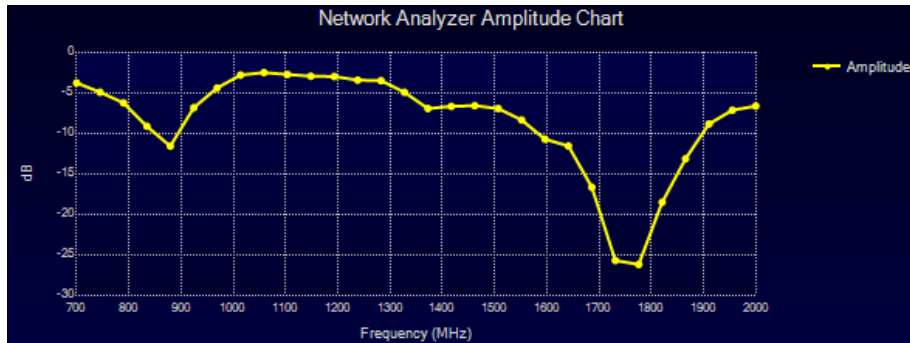


Figura 11 Pérdidas por retorno medido con el medidor de parámetros de antenas.

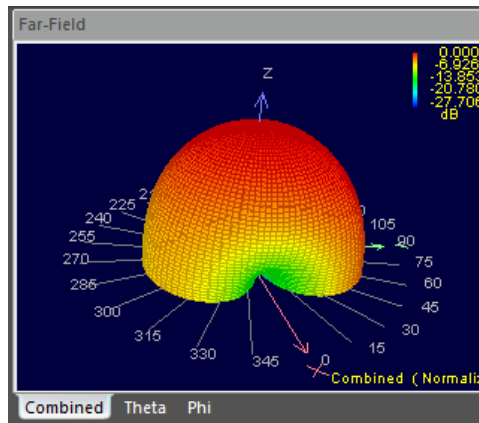


Figura 12 Patrón de radiación medido con el medidor de parámetros de antenas.

## 5. Discusión

A partir de la simulación y caracterización de la antena fractal de Sierpinsky diseñada y onstruida para operar en las bandas de 900 MHz y 1.8 GHz, se encontraron resultados relevantes. Una antena fractal basada en triángulos autosimilares de Sierpinsky presenta un periodo de operación igual a 2, por lo que en cada iteración se espera que la antena opere en una frecuencia multiplicada por un factor de dos. Sin embargo, nuestros resultados de simulación y experimentales muestran que esto no ocurre. Más aún, los resultados experimentales y de simulación muestran que el factor entre la frecuencia de una iteración a otra disminuye conforme aumentan las iteraciones. En particular se encontró que el factor entre las frecuencias de resonancia de la iteración 1 y la 2 es de 3.48, mientras que entre las iteraciones 2 y 3 es de 1.84. De esta forma la antena fractal se diseñó para que la segunda iteración resonara a 900 MHz y, por consecuencia, la tercera iteración resonara aproximadamente al doble (1.8 GHz). Los resultados experimentales muestran que el ancho de banda alrededor de las frecuencias de resonancia de la antena fractal garantiza que opere en las bandas GSM de 900 MHz y 1.8 GHz aunque la frecuencia máxima de resonancia estuvo en otras frecuencias (901 MHz y 1.76 GHz). Este trabajo muestra una forma para el diseño de antenas multibanda con el uso de la geometría fractal, al cambiar el material que se utiliza en el diseño de las antenas se debe tomar en cuenta las propiedades que posee ya que de alguna forma la frecuencia de resonancia estará afectada por el tipo de material utilizado.

Para lograr un diseño acertado de la antena fractal de Sierpinski resulta importante encontrar el valor adecuado de la constante  $k$ , la cual relaciona la frecuencia de operación de la iteración cero (frecuencia más baja) con la altura de la antena de Sierpinski, para obtener resultados precisos de las frecuencias de resonancia que se desean lograr con esta antena. Debido a que el valor de esta constante depende del tipo de material y características electromagnéticas de la placa de circuito impreso con la que se construirá la antena, una buena forma de encontrar este valor es mediante simulaciones. En nuestro caso el valor de la constante  $k$  resultó ser 0.142.



## **6. Conclusiones**

Se comprobó de forma experimental y por simulación las características multibanda de una antena fractal de Sierpinski y se determinó la relación entre las frecuencias de resonancia de una iteración a otra. Se encontró que la relación entre las frecuencias de resonancia para la segunda y tercera iteración obedece a un factor de aproximadamente 2 (1.84 para ser precisos) por lo que la antena fractal se diseñó para que la segunda iteración operara a una frecuencia de 900 MHz y, por consecuencia, la tercera iteración operara cerca de 1.8 GHz. Al construir la antena es importante que sea lo más parecido posible a la estructura y parámetros utilizados en el programa de simulación ya que así podremos obtener resultados experimentales más cercanos a los que se obtienen con la simulación.

## **7. Referencias**

- [1] A. Balanis Constantine, *Antenna theory analysis and design*. 1982. Wiley. New York.
- [2] A. Balanis Constantine, *Modern antenna handbook*. 2008. Wiley. Canada.
- [3] A. F. Molisch, *Wireless communications*. 2006. IEEE Press.
- [4] A. Cardama Aznar, *Antenas*. 2004. Alfaomega.
- [5] D. H. Werner, S. Ganguly, "An overview of fractal antenna engineering research". *IEEE Journals & Magazines*. 2003. Pp. 38-57.
- [6] R. P. Dwivedi, D. Upadhyay, "High gain dual band antenna using fractal geometry for mobile communication". *IEEE Conference Publications*. 2015. Pp. 50-55.
- [7] P. B. Nayak, S. Verma, P. Kumar, "Multiband fractal antenna design for Cognitive radio applications". *IEEE Conference Publications*. 2013. Pp. 115-120.
- [8] A. A. Potapov, "The base of fractal antenna theory and applications: Utilizing in electronic devices". *IEEE Conference Publications*. 2013. Pp. 62-67.
- [9] Y. Yuan-hai, J. Chang-peng, "Research of fractal technology in the design of multi-frequency antenna". *IEEE Conference Publications*. 2011. Pp. 1-4.

- [10] N. Naresh Kumar, K. Saran Krishna, Y. K. Choukiker, S. K. Behera, "Compact modified Sierpinski fractal monopole antenna for multiband wireless applications". IEEE Conference Publications. 2014. Pp. 1264-1266.
- [11] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, A. Cardama, "On the Behavior of the Sierpinski Multiband Fractal Antenna". IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 46. No. 4. Abril 1998.
- [12] A. Rodas Vásquez, Aplicación de las antenas fractales en las telecomunicaciones. 2010. Universidad católica popular del Risaralda.
- [13] D. Mocencagua Mora, Antenas Fractales. 2002. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [14] C. Sagredo Salazar, Desarrollo de una antena fractal multibanda para redes inalámbricas de área local. 2008. Universidad Simón Bolívar.
- [15] D. A. Arcos Cerda, Diseño e implementación de una antena yagi fractal en las bandas de 200, 400 y 800 MHz. 2007. Escuela Politécnica Nacional.

# **SISTEMA DE COMUNICACIÓN UNIDIRECCIONAL POR MEDIO DE LUZ VISIBLE**

***Manfredo Manuelievich Ceja Pachinski***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*a12112001100@alumnos.azc.uam.mx*

***Genaro Hernández Valdez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ghv@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Actualmente, la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco cuenta con un sistema de alarmas contra sismos, incendios y apertura de accesos a lugares restringidos. Sin embargo, este conjunto de alarmas no se encuentra conectado en red, por lo que el monitoreo de las alarmas resulta complicado para el personal de Protección Civil y Vigilancia de la Unidad. En este artículo, se propone el uso de enlaces unidireccionales de comunicación por medio de luz visible para integrar una red de alarmas que permita, en todo momento, monitorearlas de manera remota. En particular, en el presente artículo se muestra el diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema de comunicación inalámbrico unidireccional de bajo costo, capaz de transmitir información relacionada al estado de un sensor (alarma) por medio de luz visible láser. El sistema desarrollado permite transmitir una señal de audio en formato analógico utilizando modulación de amplitud o una señal de datos en formato digital utilizando códigos de línea. Los resultados experimentales muestran que, en condiciones severas de interferencia, el desempeño del sistema de comunicación es satisfactorio para enlaces con línea de vista de hasta 16 metros de alcance y tasas de transmisión de 100 bits por segundo.

**Palabra(s) Clave(s):** Comunicaciones, inalámbrico, láser, luz, transceptor.

## **1. Introducción**

Recientemente, la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco ha estado presentando problemas en su sistema de alarmas contra sismos, incendios, y apertura de accesos a lugares restringidos. Debido a que estas alarmas son independientes de una red central, resulta complicado monitorearlas de manera constante y remota, principalmente por la falta de personal de Protección Civil y Vigilancia que cubra todas las zonas de la Universidad.

En el mercado existen sistemas completos de alarmas en red que se pueden monitorear, activar y desactivar a través de un servidor central. El problema de estos sistemas es que su costo es elevado y requieren tanto de la instalación de cableado (fibra óptica) como de la sustitución total del sistema de alarmas con las que ya cuenta la Universidad, ya que son sistemas integrales y no pueden ser adaptados a un sistema de alarmas ya existente. También, éstos requieren importación y mantenimiento realizado por profesionales propios de las empresas que venden dicho sistema. En el presente artículo, se desarrolla un sistema de comunicación unidireccional por medio de luz visible en medios no guiados con línea de vista para resolver el problema de monitoreo remoto del conjunto de alarmas de la Universidad a un bajo costo.

Las comunicaciones por medio de luz visible (VLC, acrónimo del término en inglés "Visible Light Communications") son una categoría de las comunicaciones ópticas cuya principal característica es el uso de las longitudes de onda del espectro visible como medio para transportar información [1]-[9]. En las VLC la información es transmitida como luz, ya sea en medios guiados (fibras ópticas) o no guiados (espacio libre). Las VLC son una excelente alternativa para el problema que se pretende resolver en el presente trabajo debido a que el espectro visible no requiere licencias para su uso, además de presentar características particulares en cuanto a seguridad y propagación (interferencia, multitrayectorias, entre otras [1]).

De esta forma, el prototipo propuesto en este artículo se basa en la transmisión de información a través de luz visible láser en un medio inalámbrico y tiene la capacidad de comunicar el estado y ubicación de la alarma que se desea

monitorear. Debido a que el sistema propuesto no está basado en un medio de propagación guiado, no requiere de una instalación compleja y resulta flexible con respecto a la reconfiguración de la red de alarmas. Además, el sistema de comunicación propuesto no afecta o satura el espectro de radiofrecuencia debido a que opera en bandas sin licencia del espectro de luz visible, por lo que ofrece una alternativa a los sistemas WiFi, ZigBee, entre otros. El sistema de comunicación que aquí se presenta es capaz de transmitir señales de tipo analógico (señales de audio) o digital (estados encendido/apagado) de manera inalámbrica utilizando luz visible generada por un módulo láser. El procesamiento de la información requerido a lo largo del sistema de comunicación se realiza utilizando tarjetas de desarrollo de arquitectura abierta. Además, los dispositivos de control del diodo láser y del fotodetector se construyen utilizando componentes de fácil acceso, como son amplificadores operacionales, transistores, resistores, entre otros. Todo esto permite mantener un costo muy económico para su fabricación.

## **2. Desarrollo**

Las VLC en medios no guiados utilizan principalmente 2 fuentes de luz ópticas: los LED's (Light Emitting Diode) y los diodos LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), ambos basados en semiconductores, presentan una velocidad de conmutación (velocidad encendido–apagado) mucho mayor a las fuentes tradicionales de luz, como lo son los focos incandescentes. En el presente trabajo se utiliza el diodo LASER debido a que presenta una mayor directividad que el LED. Esto permite que la potencia óptica se concentre en un área menor para el LASER que para el LED haciéndolo también más eficiente a la hora de su detección. A su vez, el diodo LASER presenta menor ancho de línea, por lo cual, la luz que genera es más pura espectralmente y tiene poca dispersión cromática. Esto permite minimizar la dispersión de los pulsos en el dominio del tiempo y, por consecuencia, se logran mayores tasas de transmisión.

En el presente trabajo, la intensidad luminosa de la fuente óptica es modulada en amplitud de manera digital por una secuencia de datos binarios (esto se basa en la

presencia y ausencia de luz) y de manera analógica por una señal de audio (esto se basa en variaciones continuas de la intensidad de luz). Estas variaciones luminosas son detectadas en el receptor por un dispositivo que transforma la energía lumínica (fotones) en energía eléctrica. Los dispositivos que realizan dicha tarea son los fotodiodos y los fototransistores. Las principales diferencias entre estos dispositivos radican en su sensibilidad (corriente generada en función de intensidad de luz incidente) y velocidad de respuesta. Con respecto a estas características el fototransistor supera al fotodiodo, por lo que se optó por hacer uso del fototransistor.

En la figura 1 se muestra el diagrama a bloques del sistema de comunicación unidireccional desarrollado en este trabajo para la transmisión de señales de audio y de datos por medio de la propagación de luz visible en medios no guiados (inalámbricos).

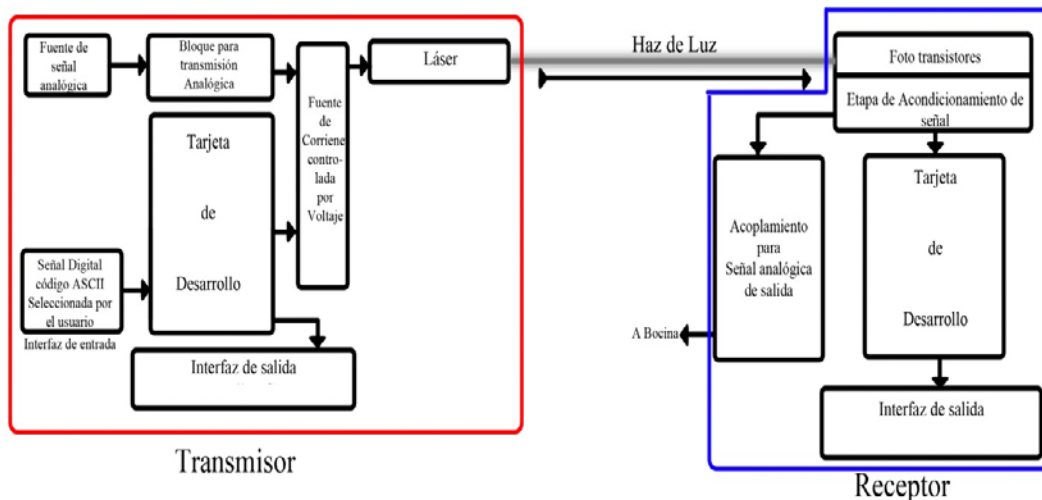


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema de comunicación unidireccional inalámbrico.

En la figura 1 se observa que la fuente de corriente controlada, que realiza la modulación, trabaja con señales de entrada tanto analógicas como digitales, a su vez, en dicho bloque se realiza el ajuste de la señal para su óptima transmisión. La selección de la entrada se realiza por medio de un interruptor simple, por lo cual, la comunicación de información analógica es independiente de los bloques de procesamiento de datos digitales y sólo se puede enviar información de un tipo a

la vez. El bloque de transmisión analógica en el transmisor y el bloque de señal analógica de salida, en el receptor, cuentan con conectores de audio de 3.5 mm para acoplar transductores de audio. Las tarjetas de desarrollo tienen la tarea de interpretar el dato en forma digital, desplegarlo en las interfaces de salida, y realizar el procesamiento de dicho dato para su transmisión y recepción de manera serial. La etapa de Fototransistores y Acondicionamiento de señal en el receptor, tienen la función de convertir la energía lumínica en energía eléctrica, amplificándola para que tenga niveles adecuados de voltaje para su procesamiento. En el transmisor, el bloque de Interfaz de Entrada, consta de un par de botones para selección de dato e inicio de transmisión.

Un aspecto importante en el desarrollo del presente prototipo es el diseño y construcción del modulador de la fuente óptica. Estos moduladores se basan en circuitos capaces de controlar la corriente que fluye por las fuentes ópticas en función de la señal de información recibida. Para cambiar la intensidad de una fuente óptica basada en semiconductores, existen al menos dos posibilidades: modulación por ancho de pulso (la cual que se basa en variar el ciclo de trabajo de la fuente) y el control de intensidad mediante control de corriente (el cual se basa en controlar la corriente que fluye por el dispositivo óptico semiconductor para controlar la cantidad de luz emitida). Esta segunda técnica es la que se utiliza en el presente trabajo.

Debido a que el voltaje de encendido para el diodo láser utilizado es fijo (5 Voltios), la corriente que fluye a través de éste se ajusta con el uso de una fuente de corriente MOSFET. El diseño y construcción de esta fuente de corriente se aborda a continuación.

### **Diseño y construcción del circuito transmisor**

Basado en la fuente de corriente "KA70EI" [2], en el presente proyecto se realizó la modificación al circuito mostrado en la figura 2 para adaptarlo a los requerimientos del diodo láser seleccionado. Debido a que el diodo láser utilizado no cuenta con una hoja de datos apropiada, exceptuando su valor de voltaje de

encendido, se realizó la caracterización de éste una vez construida la fuente de corriente.

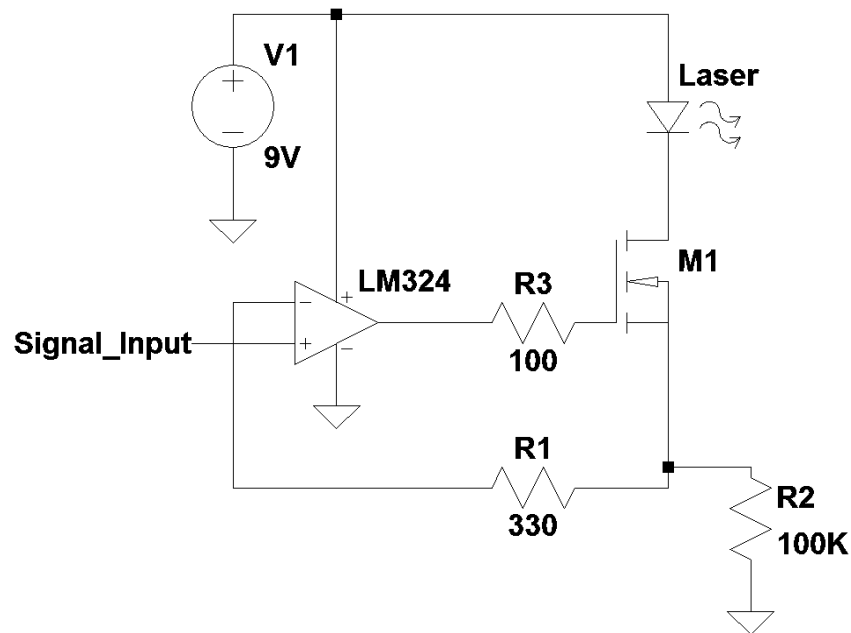


Figura 2 Fuente de Corriente (Current Sink) con modificaciones para diodo láser.

Para proteger a la fuente óptica se utilizó un potenciómetro de 100 K $\Omega$  ( $R_2$  en figura 2), para determinar la resistencia de carga mínima para que éste radiara de manera apropiada, para un nivel de voltaje de entrada máximo.

A partir de pruebas realizadas, se determinó que, la resistencia  $R_2$  apropiada para el circuito fue de 10 $\Omega$ , generando una corriente máxima total de 30 mA. (dato proporcionado por la fuente de voltaje). Con ello, la función de transferencia correspondiente a los valores de voltaje de entrada de operaciones es como se muestra en la ecuación 1.

$$I_{out} = (6 \times 10^{-3}) V_{in} \quad (1)$$

Debido a que el sistema de comunicación funciona con una fuente única de 9V y dado que no es posible, con el circuito diseñado, modular valores negativos de la señal de entrada con el dispositivo óptico, se tiene que añadir un voltaje de “offset” a la señal moduladora para que ésta pueda ser correctamente transmitida por la



fuente de luz. De manera experimental, y utilizando un amplificador operacional en configuración no inversora, se diseñó el circuito mostrado en la figura 3, en donde:  $R1$  y  $R3$  son potenciómetros que ajustan el offset y la ganancia respectivamente;  $R_{ser}$  es la resistencia interna de la fuente de señal analógica, obteniendo un promedio de  $40\Omega$  para distintas salidas de audio de distintos dispositivos; y la fuente de voltaje  $V_{Offset}$  se realizó con la fuente regulada LM7805.

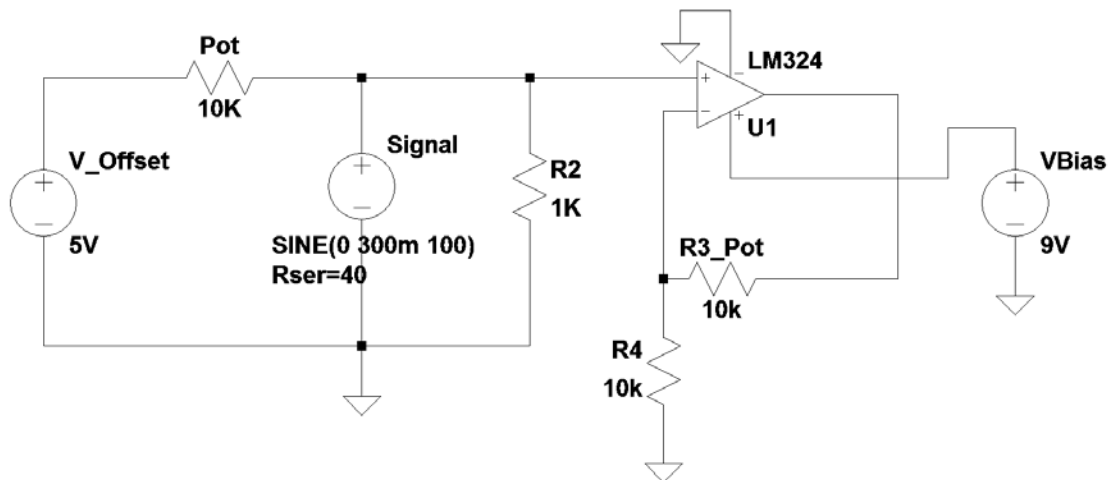


Figura 3 Bloque de acondicionamiento de señal analógica.

La función de transferencia para la configuración no inversora del amplificador operacional está dada por la ecuación 2.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R3}{R4}\right) V_{in} \quad (2)$$

En donde  $V_{in}$  es el voltaje de la señal más el voltaje de offset.  $V_{in}$  se ajusta modificando la ganancia, la cual no sólo afecta a la señal moduladora (Signal) sino también al voltaje de offset. Es por eso que se añadieron 2 resistencias variables para ajustar  $V_{in}$  a los valores adecuados para su modulación. En la figura 4 se muestra un ajuste incorrecto en los valores de offset y ganancia, con lo cual, la señal a transmitir (señal de audio) se ve recortada por la parte superior. En la figura 5 se muestra el ajuste correcto de dichos parámetros. Así mismo, se tiene que considerar la potencia de salida, ya que se puede tener un ajuste en el cual la

señal no es distorsionada, pero la potencia de salida del láser (debido al voltaje de offset) no es suficiente para lograr la transmisión.

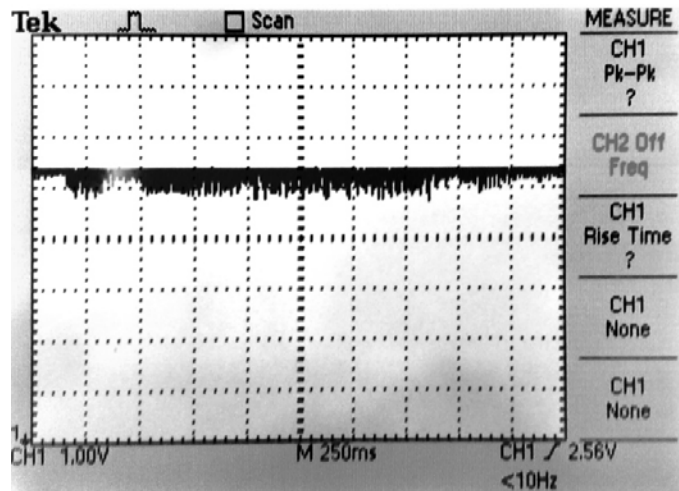


Figura 4 Distorsión de la señal. Saturación por ajuste incorrecto de Ganancia–Offset.

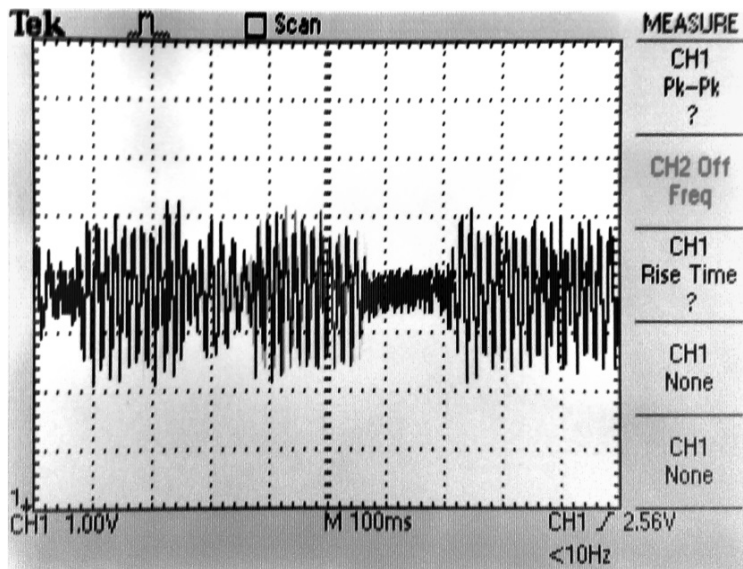


Figura 5 Ajuste correcto Ganancia – Offset.

Para la transmisión de información de manera digital (representando dicha información con dos niveles de voltaje para el '1' y '0' lógicos) se emplean los códigos de línea. Estos son códigos utilizados para la transmisión en banda base (sin el uso de portadoras) de la información, representándola en amplitud en función del tiempo. Se requiere sincronía entre el transmisor y el receptor para

detectar cada uno de los símbolos codificados (bits). El tipo de transmisión que se utiliza en el presente trabajo para lograr sincronía a nivel de bit es la transmisión asíncrona.

El código más sencillo es el unipolar sin retorno a cero (Unipolar NRZ) ya que presenta sólo dos niveles y mantiene el mismo nivel durante todo el tiempo de bit, lo cual en el dominio de la frecuencia, lo hace más eficiente (necesita menor ancho de banda). Así mismo, este código de línea presenta desventajas a la hora de transmitir cadenas largas de datos, sobre todo cuando se transmiten cadenas largas de un mismo dato binario, ya que existe la posibilidad de perder sincronía entre transmisor – receptor. Además, este código de línea presenta un valor medio de voltaje de la señal diferente de cero (acumulación de un voltaje de deriva), lo cual hace que con el tiempo, puedan confundirse los símbolos en el receptor [3]. Sin embargo, por su simplicidad y bajo ancho de banda requerido, el código unipolar NRZ es la mejor opción para aprovechar al máximo las prestaciones del sistema, por ello se eligió para este proyecto. El código Unipolar NRZ representa a la señal moduladora para transmitir la señal de información utilizando una portadora, en este caso luz. Como se mencionó anteriormente, la modulación en amplitud digital es diferente respecto a la modulación analógica en el sentido de que la primera sólo presenta dos niveles posibles de la señal (presencia y ausencia de luz).

Para esta sección se diseñó un código de programación para las tarjetas de desarrollo de arquitectura abierta (*TI Stellaris Launchpad* y *Arduino Leonardo*) para que se pudiera transmitir, en código ASCII los números del 0 al 9, estableciendo sincronía entre las tarjetas para la correcta detección de los distintos bits. En las figuras 6 y 7 se muestran los diagramas simplificados a bloques del programa para el transmisor y receptor respectivamente.

La tasa de transferencia de datos se establece, para ambas tarjetas, definiendo el tiempo de bit en el código, con esto, se asegura que ambas operen con el mismo tiempo de bit, una vez sincronizadas con los dos primeros pulsos (transmisión asíncrona). Existe la posibilidad de que el receptor ajuste su tiempo de bit en función de la duración del pulso de sincronía pero como se trata de un enlace

punto a punto, no es necesario. Dicha característica sería útil para la conexión en un nodo, o un receptor central, el cual recibe datos de distintas fuentes a diferentes tasas de transmisión.

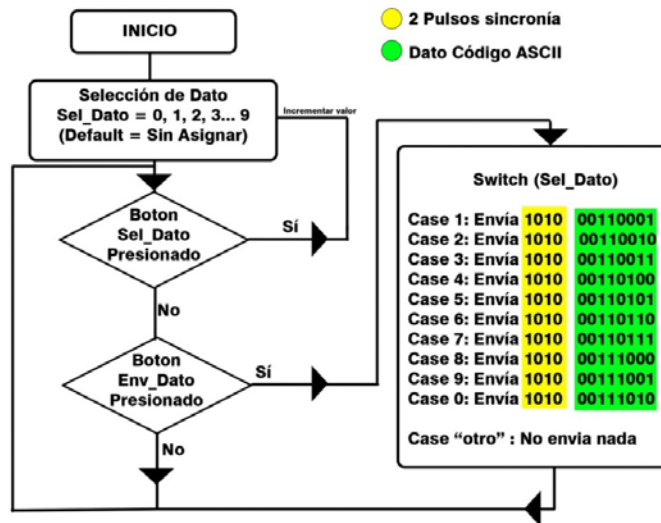


Figura 6 Diagrama simplificado a bloques del código de transmisor digital.

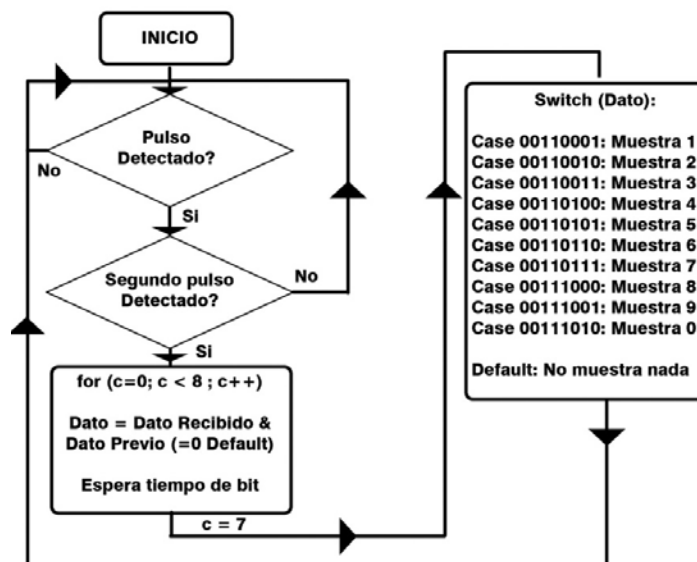


Figura 7 Diagrama simplificado a bloques del código de transmisor digital.

La interfaz de usuario para el transmisor se realizó utilizando una pantalla LCD de 7 segmentos para indicar el dato que se va a transmitir. A su vez, se utilizaron los

LEDs propios de la tarjeta de desarrollo para indicar que no hay dato a transmitir (al encender la tarjeta – inicio de código) indicando con destellos de color rojo. Se usó el LED color verde para monitorear la transmisión de los datos.

Para el receptor, la interfaz de usuario se realizó utilizando la interfaz serial contenida en la IDE de programación (*Integrated Development Environment*), para monitorear los distintos datos recibidos y los ciclos en los que se encuentra operando el programa, esto es, para facilitar la detección de errores en la recepción y en la operación del código.

### Diseño y construcción del circuito receptor

Utilizando el fototransistor PT331C, se realizó un circuito basado en la configuración de colector común para la detección de la luz incidente en éste. En la figura 8 se muestra dicho circuito, en el cual la resistencia de carga  $R1$  se seleccionó para que, en base a la corriente que proviene del par Darlington, se genere un voltaje que servirá para la entrada del Amplificador Operacional. Dicha resistencia se seleccionó de manera experimental, ya que, para valores de resistencia muy grandes, el amplificador operacional no es debidamente aterrizado, con lo cual, se obtienen señales no deseadas a la salida de éste. En cambio, para valores de resistencia muy pequeños, el voltaje generado en ésta no es suficiente para la correcta detección de la señal.

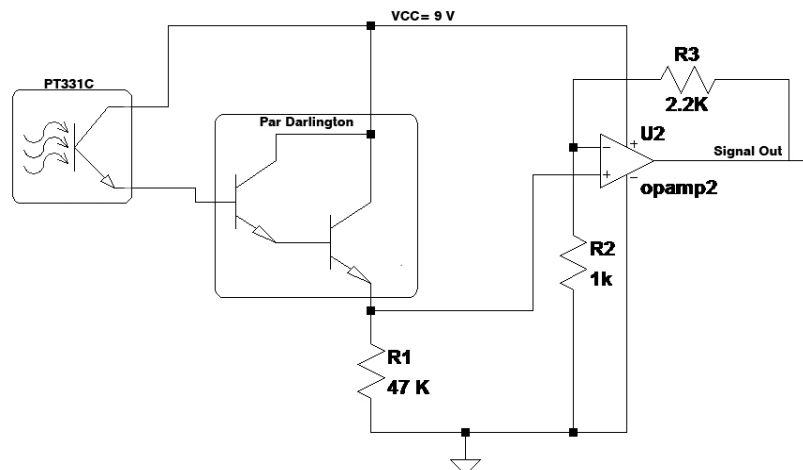


Figura 8 Diagrama simplificado a bloques del código de transmisor digital.

Así mismo se utilizaron los cuatro amplificadores operacionales contenidos en el circuito integrado, conectándolos de manera secuencial (cascada) y con una configuración de ganancia para cada uno de  $K=2$ , resultando una ganancia total  $K=8$ . Dicha selección de ganancia se realizó para maximizar la relación entre ganancia y ancho de banda.

En base a las especificaciones provenientes de la hoja de datos del foto transistor, se determinó el ancho de banda del dispositivo en base a su tiempo de subida ( $t_{rise}$ ). Así mismo, debido al láser utilizado, se tiene una sensibilidad relativa al máximo en la conversión luz – corriente eléctrica del 80% [4].

Dado el valor del tiempo de subida ( $t_{rise}$ ) de éste dispositivo, se puede obtener un valor teórico de ancho de banda dado por la ecuación 3.

$$BW = \frac{0.35}{t_{rise}} = \frac{0.35}{15_{\mu s}} = 23.333 \text{ KHz} \quad (3)$$

Para determinar el ancho de banda experimental, considerando todas las etapas del sistema, se colocó la fuente óptica junto al foto receptor y, mediante un barrido en frecuencia de la señal de entrada, se determinó dicho ancho de banda muestreando la salida del último amplificador operacional con el osciloscopio. El dato obtenido fue de: 24 KHz. En la tabla 1 se muestran los resultados de la caracterización de dicho dispositivo.

Tabla 1 Valores obtenidos en caracterización de fototransistor.

Parámetro	Valor Teórico	Valor Experimental
Ancho de Banda	23.333 kHz	24 kHz
Tiempo de Subida	15 $\mu$ s	14.6 $\mu$ s

### 3. Resultados

En este apartado se presentan las pruebas experimentales del prototipo desarrollado. Primeramente, se realizó una prueba experimental para determinar el alcance del enlace de tal forma que el desempeño del sistema sea satisfactorio (el desempeño se basa en un criterio subjetivo de la relación señal a ruido

considerando la transmisión de señales de audio). En la figura 9 se muestra el prototipo desarrollado sobre una tablilla de conexiones. En el lado izquierdo de la Fig. 9 se muestra el transmisor y del lado derecho el receptor. El fototransistor está dentro de un reflector, obtenido de una linterna, para maximizar la captura de luz y hacerla incidir en éste, facilitando el ajuste entre el transmisor y receptor.

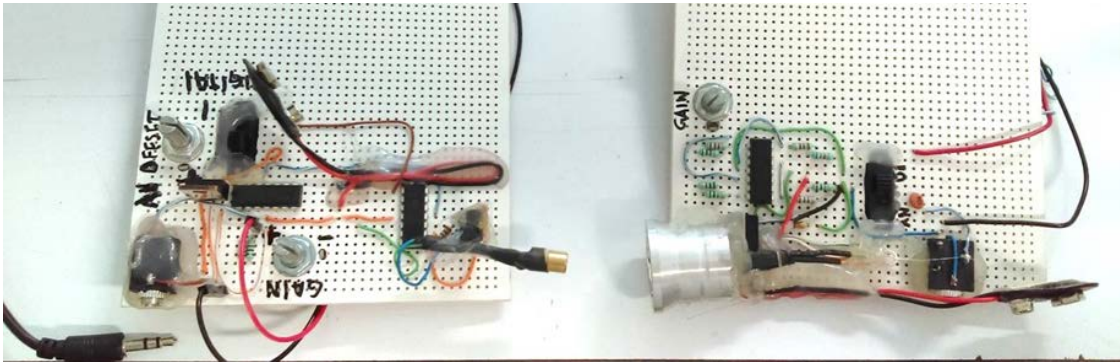


Figura 9 Prototipo Desarrollado y construido sobre una tablilla de conexiones.

Como se mencionó en el párrafo anterior, las pruebas de alcance se realizaron con transmisión de una señal analógica de audio ya que la transmisión digital se realiza por medio de ráfagas de bits y requieren que el usuario inicie la transferencia (con respecto a la transmisión digital, una medida de su desempeño es la evaluación de la probabilidad de bit erróneo). Durante esta prueba es importante alinear el transmisor y receptor para lograr la máxima captura de potencia óptica.

Se realizaron 2 pruebas variando las condiciones de luz interferente (durante la noche: poca luz interferente; y durante el día: luz interferente intensa). En la tabla 2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 2 Alcance del sistema en diferentes condiciones de luz.

Condición de Luz	Alcance
Ocaso – Noche	> 30m
Medio día, Luz solar intensa.	> 16m

De la tabla anterior podemos concluir que el alcance se ve limitado por los niveles de luz natural (Sol) y artificial (lámparas incandescentes) que pueden interpretarse como ruido que afecta el enlace. Por ello, la potencia óptica de la fuente en el transmisor y el ajuste de la orientación entre el transmisor y receptor son factores relevantes en el desempeño del sistema. Ligeras variaciones de estos parámetros, sobre todo en el transmisor, mueven el haz de luz fuera del área de recepción del fototransistor.

Para una distancia de 16 m se tiene un radio de tolerancia de posición de 1.5 cm para el receptor, con lo cual se puede definir la divergencia del haz de luz y/o la tolerancia de desvío de receptor como se ejemplifica en la ecuación 4.

$$\text{Ángulo de divergencia} = 2\theta = 2 * \arctan\left(\frac{0.015}{16}\right) = 1.8749 \times 10^{-3} \text{ rads} \quad (4)$$

Tal como se esperaba, aunque el transmisor y receptor se encuentren dentro del margen de tolerancia de orientación, hay una disminución en la potencia recibida que es directamente proporcional al desvío del haz entre transmisor y receptor, por lo cual, la señal se ve atenuada cuando el receptor no está orientado directamente al haz de luz.

Por otra parte, en la transmisión digital, debido a que los pulsos generados por el circuito del transmisor presentaron un tiempo de subida grande, la tasa de bits de transmisión se vio afectada. En particular, los resultados experimentales revelaron que el sistema de comunicación ofrece transmisiones exitosas a una velocidad de 100 bps, y conforme se aumenta la velocidad, aumentan los errores en la detección y se pierde la sincronía debido al aumento correspondiente de la interferencia inter-símbolos. En la figura 10 se muestra la ráfaga de bits transmitidos para una velocidad de 1 kbps. Debido a la distorsión que se presenta, el receptor presenta probabilidades de bit erróneo grandes a la hora de la detección de cada símbolo. Este comportamiento se puede aminorar utilizando un circuito conformador de pulsos y/o utilizando un circuito que implemente la codificación de canal.



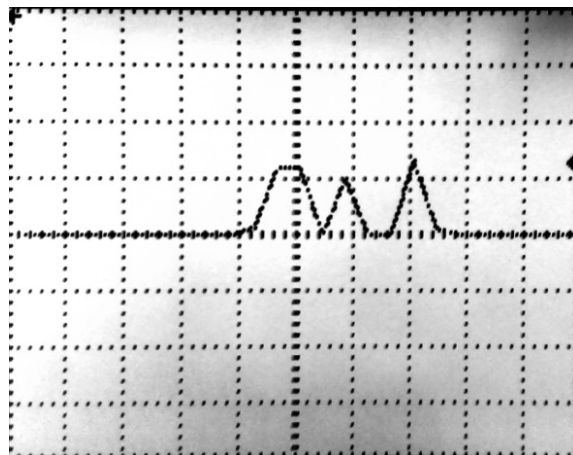


Figura 10 Distorsión de pulsos por velocidad de subida del transmisor

Por otra parte, las figuras 11 a 13 muestran el proceso de prueba con condiciones de luz intensa. Se aprovechó la sombra generada para poder observar la huella del haz de luz para orientar el receptor.

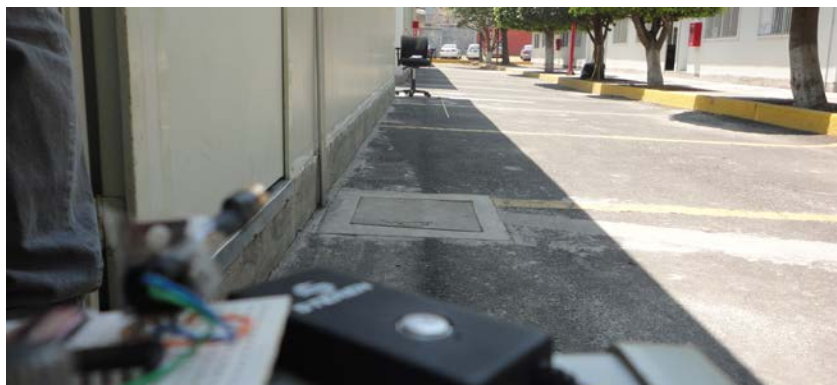


Figura 11 Pruebas de enlace en condiciones de luz solar intensa.



Figura 12 Pruebas de enlace. Distancia 8 m. En el suelo, un flexómetro extendido a 3 m.



Figura 13 Distancia máxima de prueba: 16 m.

#### **4. Discusión**

En este trabajo se desarrolló un sistema de comunicación direccional por medio de luz visible en medios no guiados, el cual representa un primer y relevante paso para resolver el problema de monitorear de forma remota el sistema de alarmas de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

El sistema desarrollado funcionó a una distancia mayor a la esperada inicialmente, pasando de 5m a 16m en el peor escenario de interferencia luminosa posible. Cabe decir que a dicha distancia la recepción fue sumamente buena (aunque su evaluación fue subjetiva), por lo cual, con un ajuste apropiado de orientación entre el transmisor y receptor, la distancia puede ser, cuando menos, duplicada.

Debido a que en la Universidad no se cuenta con equipo de medición de potencia óptica, no fue posible establecer umbrales de ésta para el funcionamiento del equipo, por tanto, se tuvo que evaluar su desempeño juzgando de manera subjetiva la calidad de la señal de audio recibida (música). Una de las afectaciones que sufrió la señal fue de atenuación de potencia, con lo cual, se modifica la relación señal a ruido (SNR), con lo cual el ruido reduce la calidad de la señal. Sin embargo, durante las pruebas realizadas, esta afectación no fue suficiente para tener diferencias significativas entre la señal transmitida y recibida.

Por otra parte, debido a que el circuito del transmisor digital no realiza conformación de pulsos, la tasa de bits de transmisión se vio limitada a valores menores a 1 kbps. En particular, se observó que el sistema ofrece transmisiones exitosas a una velocidad de 100 bps y, conforme se aumenta la velocidad,

aumentan los errores en la detección y sincronía debido al aumento correspondiente de la interferencia entre pulsos.

Como trabajo a futuro y en el corto plazo, se encuentra el aplicar una metodología de medición para evaluar el desempeño del sistema desarrollado en términos de la relación señal a ruido (SNR) en el caso de la transmisión analógica de señales de audio y de la probabilidad de bit erróneo (BER) en el caso de la transmisión digital de datos binarios. Esta última es la más sencilla de obtener, pues sólo se debe de transmitir una secuencia binaria conocida por el receptor, contar el número de bits erróneos y dividirlo entre el total de bits transmitidos para evaluar la (BER).

## **5. Conclusiones**

Dado el objetivo de diseñar un sistema de comunicación por medio de luz visible para el monitoreo de las alarmas de la Universidad, con la condición de que éste debía de ser de bajo costo, se logró diseñar y evaluar un sistema que cumple y sobrepasa los requisitos que se necesitarían para detectar, de manera remota, el estado de las alarmas. No sólo es posible transmitir su estado, encendido/apagado, sino también un identificador compuesto por una palabra digital. Debido a que no se requieren tasas de transferencia elevadas, el costo de fabricación del sistema se estima por debajo de los \$500.00 pesos M.N. (\$30.00 USD).

Además, las pruebas al sistema de comunicación permitieron vislumbrar otras aplicaciones, como es la conexión de sensores en red que se encuentran en áreas de interferencia electromagnética, así mismo, debido a la directividad del sistema, se puede reutilizar el canal y/o longitud de onda para distintos dispositivos, o lugares en donde se tenga que evitar el uso de fuentes de radiación electromagnética como en hospitales, conexión entre equipo multimedia (sistemas de teatro en casa) y otras aplicaciones que si bien pueden ser cubiertas con la tecnología de radiofrecuencia, las comunicaciones ópticas inalámbricas ofrecen una alternativa que presenta ventajas notables como la nula interferencia entre sistemas, afectaciones al ruido electromagnético, y seguridad, ya que, al tener un

haz de luz concentrado, no es fácil el intervenir el enlace sin interrumpirlo. Por lo tanto, su uso estará determinado por las necesidades que se presenten a la hora de requerir un enlace de comunicaciones, ya sea en costo, seguridad, inmunidad al ruido, interferencia, bandas del espectro, entre otros aspectos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Z. Ghassemlooy, Indoor Optical Wireless Communication Systems – Part I: Review. [https://www.northumbria.ac.uk/static/5007/ceispdf/ncr\\_iow.pdf](https://www.northumbria.ac.uk/static/5007/ceispdf/ncr_iow.pdf), Julio 2016.
- [2] Linear Current Modulators for High Power LEDs. [http://www.modulatedlight.org/optical\\_comms/LED\\_linear\\_modulator.html](http://www.modulatedlight.org/optical_comms/LED_linear_modulator.html) Abril 2016.
- [3] F. C. Allard, Fiber Optics Handbook for Engineers and Scientists. McGraw – Hill, chapter 7 Modulation. section 3.2.
- [4] PT331C Datasheet. Everlight Electronics Co. Taiwan. 2016.
- [5] A. Jovicic, J. Li, T. Richardson, “Visible Light Communications: Opportunities, Challenges and the Path to Market”. IEEE Communications Magazine. Dec. 2013. Pp. 26-32.
- [6] T. Komine, M. Nakagawa, “Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights”. IEEE Trans. Consumer Electronics. Vol. 50. No. 1. Feb. 2004. Pp. 100–07
- [7] A. T. Hussein, J. M. Elmirghani, “Mobile multi-gigabit visible light communication system in realistic indoor environment”. Int. J. Lightw. Technol. Vol. 33. No. 15. Aug. 2015. Pp. 3293–3307.
- [8] S. Rajagopal, R. D. Roberts, S-K. Lim, “IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support”. IEEE Communications Magazine. ;March 2012. Pp. 72-82.
- [9] K. Cui, G. Chen, Z. Xu, R. D. Roberts, “Line-of-Sight Visible Light Communication System Design and Demonstration”. IEEE CSNDSP. 2010. Pp. 621-625.

## **7. Autores**

Ing. Manfredo Manuelievich Ceja Pachinski es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco en la Ciudad de México, MÉXICO en 2016, grado que obtuvo en el primer trimestre de 2016. Actualmente ocupa el puesto de Ayudante de Investigación en la UAM Azcapotzalco. Su Área de interés se centra pero no se limita al desarrollo de dispositivos electrónicos para sistemas de comunicaciones, antenas y redes de telecomunicaciones.

Dr. Genaro Hernández obtuvo su título de Doctor en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional en la Ciudad de México, MÉXICO en el año 2009. El Dr. Hernández Valdez es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Sus principales líneas de investigación se centran en el modelado, análisis y evaluación del desempeño de sistemas de comunicaciones móviles y en el desarrollo de dispositivos electrónicos para sistemas de comunicaciones.

# ESTIMACIÓN DE LA SEÑAL DE TV EN BANDA VHF

**José María Montoya Flores**

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI

*jmontoya@citedi.mx*

**Andrés Calvillo Téllez**

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI

*calvillo@citedi.mx*

**José Cruz Núñez Pérez**

Instituto Politécnico Nacional, CITEDI

*nunez@citedi.mx*

## Resumen

El presente artículo trata sobre la estimación de la señal de una estación de TV en la banda VHF en un área de terreno geográficamente irregular. La potencia aparente radiada de 40 kilowatts en las frecuencias de 60 a 66 MHz. Se calcularon las pérdidas de espacio libre, pérdidas en la estación transmisora, pérdidas por conectores y se determinó el área de cobertura, marcando las zonas oscuras o de no recepción. Se presentan las lecturas de campo eléctrico y la zona geográfica de mayor recepción.

**Palabra(s) Clave(s):** Cobertura VHF, perfil de trayectoria, pérdidas de propagación en espacio libre, potencia aparente radiada.

## 1. Introducción

Uno de los principales inconvenientes con los que debe enfrentarse la recepción de señales de VHF de televisión es la degradación de la señal e interrupciones súbitas, en zonas urbanas donde la topografía y el nivel de ruido radioeléctrico van en constante aumento. Es un desafío, lograr buena calidad de imagen en una zona amplia con topografía rugosa. Para lograr una buena calidad de señal se debe estimar la intensidad del campo electromagnético en puntos

distantes de la fuente de radiación; considerando elementos que pueden degradar la calidad de la señal, tal es el caso de zonas de topografía irregular como montes, lomas, rocas y no es común encontrar zonas planas o fuentes de agua; también influye el factor climático, como uno de los que deterioran la señal, produciendo atenuaciones y perturbaciones de la señal [1- 3]. Estas degradaciones se pueden apreciar en la figura 1 [4], en verde la zonas de mayor intensidad, la amarilla de mediana y la ausencia de color presenta las zonas de sombra o ausencia de señal, donde el punto en blanco es el lugar del centro de radiación, que coincide con el punto más alto de la mancha urbana y a partir de ahí la atenuación que sufre la señal por el efecto de propagación en el espacio libre.

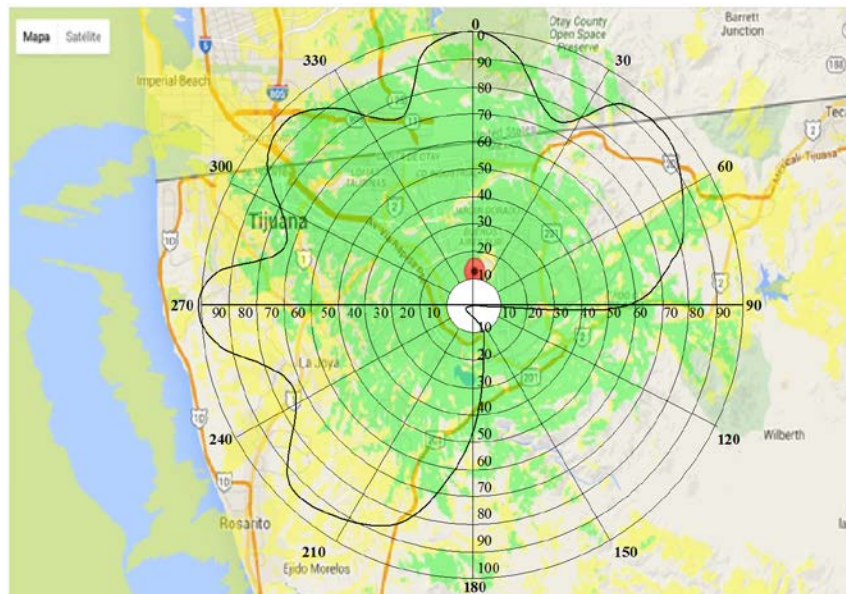


Figura 1 Centro de radiación y cobertura.

## 2. Desarrollo

El procedimiento a seguir para estimar la señal de buena calidad a un punto distante 10 km de la estación de TV, primero se debe de localizar la mancha urbana y las zonas de futuro crecimiento poblacional, una vez localizado al grueso de la población dirigir el lóbulo principal de radiación sobre esa zona, medir el máximo alcance (D) al centro de radiación, que en este caso resultó de 10 km, a partir de aquí se selecciona la potencia a radiar (PT), la altura de la antena sobre

el nivel del suelo, localizar el área bajo la cobertura y levantar los perfiles de las trayectorias de tal forma que se puedan visualizar las zonas oscuras o de no-recepción del canal y la zona de máxima radiación, asimismo se estima que la cobertura no rebase los 50 km de penetración en la frontera, para asegurar que mas allá de los 100 km puedan utilizar la misma frecuencia de los 60-66MHz.

Dicho lo anterior, se calcula la Potencia Aparente Radiada (PAR), ecuación 1.

$$PAR_{dB} = PT_{(dB)} + GT_{(dB)} \quad (1)$$

Se determina cuanta degradación de la señal al punto fijado, obteniendo así la pérdida en trayectoria por el espacio libre ( $L_p$ ), que suele definir como la pérdida de potencia sufrida por la frecuencia de la portadora ( $f$ ) de la señal de radio al propagarse en línea recta por el vacío, sin absorción ni reflexión de energía en objetos cercanos, las pérdidas son directamente proporcionales a la distancia de separación ( $D$ ) entre transmisor y receptor, siendo estas de la ecuación 2.

$$L_{p(dB)} = 32.4 + 20 \log f_{(MHz)} + 20 \log D_{(km)} \quad (2)$$

Cuanta degradación sufrió el PAR, antes de arribar al receptor, denominada como Potencia de recepción ( $P_r$ ), es la suma logarítmica de la Potencia de transmisión ( $P_t$ ), Pérdida de la línea de transmisión ( $L_t$ ), Ganancia relativa de la antena ( $A_t$ ) respecto a una isotrópica, Pérdida en espacio libre ( $L_p$ ), Ganancia de la antena de recepción con respecto a una isotrópica ( $A_r$ ), Pérdidas de línea del receptor ( $L_r$ ), la señal de arribo al receptor se calcula como se muestra en la ecuación 3, [7-12].

$$P_{r(dBm)} = P_{t(dBm)} - L_{t(dB)} + A_{t(dB)} - L_{p(dB)} + A_{r(dB)} - L_{r(dB)} \quad (3)$$

El Margen de umbral ( $M_u$ ) permite identificar la capacidad del enlace para soportar los embates climáticos, meteorológicos y topográficos, antes de que se desvanezca la señal de recepción ( $P_r$ ) en el momento de tocar el piso del Umbral de recepción o sensibilidad del equipo receptor ( $U_r$ ). y se pierda el enlace, ecuación 4.

$$M_{u(dB)} = P_{r(dBm)} - U_{r(dBm)} \quad (4).$$



Al propagarse una onda electromagnética por la atmósfera terrestre, la señal puede tener pérdidas intermitentes de intensidad, además de la pérdida normal en la trayectoria. Esas pérdidas se pueden atribuir a diversos fenómenos que incluyen efectos de corto y largo plazo. Esta variación en la pérdida de la señal se llama desvanecimiento y se puede atribuir a perturbaciones meteorológicas como lluvia, nieve, granizo, etc.; a trayectorias múltiples de transmisión y a una superficie terrestre irregular. Para tener en cuenta el desvanecimiento temporal, se agrega una pérdida adicional de transmisión a la pérdida en trayectoria normal. A esta pérdida se le llama *margen de desvanecimiento* [12-16]. El margen de desvanecimiento se incluye en la ecuación de ganancia del sistema para considerar las características no ideales y menos predecibles de la propagación de las ondas de radio, como por ejemplo la propagación por trayectorias múltiples (pérdidas por trayectorias múltiples) y la sensibilidad del terreno. El margen de desvanecimiento también tiene en cuenta los objetivos de confiabilidad del sistema, ecuación 5.

$$F_M = 30 \log D + 10 \log(6ABf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (5)$$

Siendo:

$F_M$  Margen de desvanecimiento [dB]

$D$  Distancia entre transmisor y receptor [km]

$f$  Frecuencia de la portadora [GHz]

$A$  Factor de rugosidad:

- 4 sobre agua o sobre un terreno muy liso
- 1 sobre un terreno promedio
- 0.25 sobre un terreno muy áspero y montañoso

$B$  Factor para convertir la peor probabilidad mensual en probabilidad anual:

- 1 para pasar una disponibilidad anual a la peor base mensual
- 0.5 para áreas calientes y húmedas
- 0.25 para áreas continentales promedio
- 0.125 para áreas muy secas o montañosas

El factor (1-R) para una distancia distinta de 400 km es como se muestra en la ecuación 6.

$$(1 - R) = \frac{0.0001 \times D}{400} \quad (6)$$

Para que el sistema cumpla con el objetivo de confiabilidad, se requiere que el margen de umbral del sistema ( $M_u$ ), sea mayor al margen de desvanecimiento ( $F_M$ ), ecuación 7.

$$M_u \geq F_M \quad (7)$$

Otra métrica importante es el tiempo de indisponibilidad de la señal al aire ( $P$ ), que se estima por factores como: confiabilidad ( $R$ ) corresponde al porcentaje de tiempo probable que un enlace no se interrumpe al mantener su nivel dentro del margen de desvanecimiento ( $F_M$ ), la frecuencia de la portadora ( $f$ ), la confiabilidad del sistema ( $R$ ) y la distancia entre transmisor y receptor ( $D$ ), ecuaciones 8 y 9

$$P = 6 \times 10^{-7} \times C \times f_{\text{GHz}} \times D^3 \times 10^{-F_M(\text{dB})/10} \quad (8)$$

$$R = (1 - P) \times 100 \quad (9)$$

### 3. Resultados

Se presentan las lecturas de la instrumentación, posicionando a los aparatos de medición para el levantamiento de la medición del campo lejano, los datos obtenidos se muestran en la tabla 1, mientras que en la tabla 2 se tienen los datos suministrados al enlace; en la figura 2 [4] se muestra el perfil del trayecto del punto de lectura; en la figura 3 se muestra una imagen aérea.

Tabla 1 Mediciones campo eléctrico, antena de 4 elementos y ganancia 0 dBm.

Lugares	PAR Video/Audio (dBm) 15kW		PAR Video/Audio (dBm) 20 kW		PAR Video/Audio (dBm) 40kW	
	Video	Audio	Video	Audio	Video	Audio
Plano de Tijuana						
Lomas Taurinas	6 dBm	-12dBm	2 dBm	-25 dBm	2 dBm	-6 dBm

Tabla 2 Mediciones de frecuencia.

Parámetro	Lectura
Portadora de video (MHz)	61.250019
Portadora de Audio (MHz)	65.750021
IPA Visual 1 @ .1 (MHz)	60.384125
IPA Visual 1 @ 15 (MHz)	61.29
IPA Aural 1 (MHz)	65.750016
IPA Aural 2 (MHz)	65.750018
Oscilador Local	107.0001573
Saw Filter	11.3583
	22.4964
	41.5849
Aural if Modulator	41.24997
Visual if Modulator	6.429600

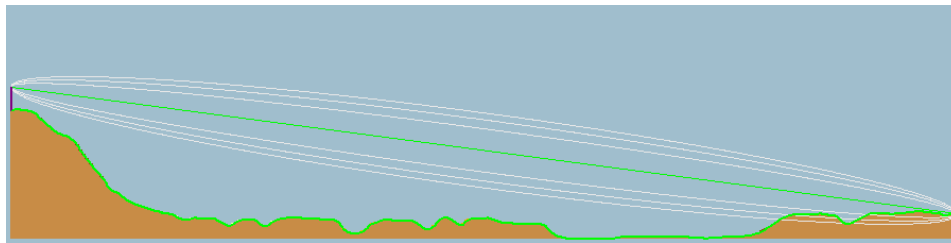


Figura 2 Perfil de trayectoria con claridad de línea de vista y la línea de libramiento del 60% de la primera zona de Fresnel.



Figura 3 Apreciación de la topografía del centro de radiación y cobertura.

#### 4. Discusión

El punto que se eligió de entre una serie de abundantes lecturas, es a 10 km de separación del punto de radiación, es un lugar donde los efectos físicos de

difracción y refracción no influyen en gran medida, por lo que la recepción de la señal es de forma directa, sin obstáculos en el trayecto; sin embargo, hay lecturas donde, si bien hay calidad en el nivel de recepción, hay una suma importante de señales con retardo, lo que produce, imágenes claras y desvanecimiento súbito, sobre todo en lugares con topografía rugosa.

## **5. Conclusiones**

Con el advenimiento de estaciones de televisión de alta potencia se puede lograr una cobertura con una lejanía de radio de hasta 50 km. La interferencia debida al uso de la misma frecuencia entre estaciones transmisoras puede ocurrir después de 100 kilómetros. Para evitar el problema de interferencia en zonas geográficamente unidas, por sus límites territoriales es necesario planear el número máximo de frecuencias. La estación transmisora debe estar en una ubicación donde el radio que alcance en línea de vista sea de hasta 50 Km. Cuando la separación entre radiotransmisores que usan la misma frecuencia es menor a 100 km se puede presentar el fenómeno de interferencia. Para evitar este fenómeno es recomendable que tengan una separación geográfica de 400 km a 500 km. Cuando se alcanza con claridad una cobertura de radio de 50 km es necesario ajustar la potencia del transmisor para que la penetración no cause interferencia. En este caso se cuenta con un transmisor que radia una potencia máxima de 100 kWPAR (70dBm), sin embargo por localizarse en un punto muy alto y a una distancia de 10 km de la frontera se procedió a emplear potencias de 10 (70dBm), 15( 71dBm) y 40 kWPAR (76dBm), logrando una buena calidad de imagen con menor potencia y una reorientación del patrón de radiación con lo cual el exceso de potencia se radia hacia una zona de más de 50 km hacia el territorio nacional asegurando de esta forma evitar la interferencia entre estaciones transmisoras adyacentes. El siguiente paso es utilizar modelos de predicción como el de Longley–Rice, debido a que en el plano topográfico, rugoso y con edificaciones, inducen fenómenos físicos como el de difracción y refracción que generan múltiples señales con trayectorias y retardos, en el punto de lectura o arribo de señal que en el receptor televisivo de DVT muestra que la recuperación

de la señal de audio y video se desvanece produciendo congelación de imagen y múltiples cuadros difusos, lo que hoy día atrae la atención para replantear el valor del PAR, esto es si se reduce el PAR mejora el audio y el video o se aumenta y se logra un mayor alcance.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Freeman, Radio System Design for Telecommunications. 1987. Wiley & Sons.
- [2] J. Seybold, "Introduction to RF Propagation". 2005. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [3] A. G. Longley, P. L. Rice, "Prediction of Tropospheric Radio Transmission Loss Over Irregular Terrain". ESSA Technical Report ERL 79-ITS 67. Julio 1968.
- [4] Nautel, RF Toolkit Resources. <http://www.nautel.com/support/technical-resources/rf-toolkit/rf-toolkit-webinars/?spMailingID=47293737&spUserID=MjA3MDQxMjlzMzQyS0&spJobID=943942555&spReportId=OTQzODY1Mjc4S0>.
- [5] Hata, M. "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services". IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. VT-29. No. 3. Agosto 1980. Pp. 317-325.
- [6] Recomendación UIT-R: P1238 Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de sistemas de radiocomunicaciones en interiores y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 900 MHz a 100 GHz.
- [7] Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems - COST 231 Final Report. COST Telecommunications. Belgic. 1999.
- [8] J. Walfisch, H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments". IEEE Transactions on Antennas and Propagation. Vol. 36. No. 12. Diciembre 1988. Pp. 1788-1796,

- [9] Propagation Effects Relating to Terrestrial Land Mobile and Broadcasting services in the VHF and UHF Bands. Recommendation ITU-R P.1406-1. Ginebra, Suiza, 2007.
- [10] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, M. Umehira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol. 32. No. 8. 1984. Pp. 822-829.
- [11] T. K. Sarkar, J. Zhong, K. Kyungjung, A. Medouri, M. Salazar-Palma, "A survey of various propagation models for mobile communication". *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*. Vol. 45. No. 3. 2003. Pp. 51-82.
- [12] J. Walfisch, H. L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environments" *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol.36. No. 12. Diciembre 1988. Pp. 1788-1796.
- [13] S. Kozono, K. Watanabe, "Influence of Environmental Buildings on UHF Land Mobile Radio Propagation". *Communications, IEEE Transactions on*. Vol.25. No. 10. 1977. Pp. 1133-1143.
- [14] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol.40. No. 2. 1992. Pp. 207-217.
- [15] H. G. Schantz, K. Siwiak, M. Z. Win, "A Comprehensive Standardized Model for Ultrawideband Propagation Channels". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*. Vol.54. No. 11. 2006. Pp. 3151-3166.
- [16] COST 231 group final report: D.J. Cichon, T. Kurner, Capítulo 4 Propagation Prediction Models.

## **7. Autores**

M.C. José María Montoya Flores nació en la ciudad de Chiapa de Corzo, Chiapas, realizó estudios de doctorado con especialidad en Ingeniería eléctrica, en CINVESTAV; obtuvo el grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería eléctrica, en CINVESTAV; es ingeniero en comunicaciones y electrónica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Fue Director de Canal Once del IPN en Tijuana, Baja California.

M.C. Andrés Calvillo Téllez: nació en la Ciudad de México, el 6 de noviembre de 1964. Recibió su título de Ingeniero de la Escuela Superior Ingeniería Mecánica y Eléctrica de Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, en 1991, y el grado de maestría en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (IPN-CITEDI) en Tijuana, México, 1993. Su interés por la investigación incluye el modelado y la simulación de la propagación de RF, el diseño de RF a nivel de sistema utilizando dispositivos FPGA.

Dr. José Cruz Núñez Pérez: nació en Uruapan Michoacán, México, el 2 de abril de 1978. Recibió el grado de maestría en ingeniería electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en Cuernavaca, México, en 2003, y el doctorado del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas de Lyon (INSA - Lyon), Francia, en 2007. En primer semestre de 2008, fue Director de Investigación de Tecnología Avanzada de Investigación SA de CV (ATR) en Guadalajara, México, donde dirigió un equipo de investigadores que trabajan en redes y telecomunicaciones arquitecturas. Desde agosto de 2008, es profesor en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI-IPN), en Tijuana, México. Es Coordinador de Investigación en el Departamento de Telecomunicaciones de CITEDI.

# AJUSTE NUMÉRICO DE LA RESPUESTA ESCALÓN DE UN CIRCUITO SERIE RC USANDO $\tau$

***Carlos Juárez Toledo***

Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex

*cjuarez@uaemex.mx*

***Irma Martínez Carrillo***

Universidad Autónoma del Estado de México, UAEMex

*imartinezca@uaemex.mx*

## **Resumen**

Un circuito serie RC consta de una resistencia conectada en serie con un capacitor el cual es muy utilizado entre otros para en el Filtro de señales, regulación del voltaje y proteger los elementos de conmutación como el circuito Snubber [1,2].

El objetivo de este artículo es obtener el comportamiento de un circuito serie RC ante una respuesta escalón por medio de aproximación polinomial, los siguientes resultados fueron incluidos:

- Sistema Real (valores obtenidos usando un osciloscopio)
- M. convencional (Matemático)
- M. Propuesto (Numérico)

En el artículo se comparan los resultados de los tres métodos donde el modelo matemático proviene de la transformada de Laplace y, el modelo numérico de un ajuste numérico por medio de la interpolación polinomial.

**Palabra(s) Clave(s):** Ajuste numérico, aproximación polinomial, circuito serie RC, constante de tiempo  $\tau$ , Transformada de Laplace.



## 1. Introducción

Un circuito RC (Resistivo Capacitivo) es compuesto por una resistencia conectada con un capacitor. Comúnmente un circuito RC se utiliza filtrar señales ya que son capaces de dejar algunas frecuencias por lo cual es llamado pasa bajos o pasa altos, de ahí proviene el nombre de llamar a los circuitos RC como filtros [3].

La finalidad del artículo es mostrar que para describir el comportamiento de un circuito serie RC ante una señal escalón no es necesario manejar los datos completos provenientes de pruebas de laboratorio o, usar expresiones provenientes de modelos algebraicos y que con una expresión polinomial basada en los tiempos  $\tau$  se puede aproximar el comportamiento del sistema. Básicamente el artículo se divide en tres partes:

- **Solución Real:** Desarrollo en laboratorio.
- **Solución Matemática:** Debido al acoplamiento capacitivo-resistivo herramientas algebraicas pueden dar solución al problema de ecuaciones diferenciales ordinarias.
- **Solución Numérica:** Para el análisis matemático se utiliza un polinomio interpolado donde se requieren una cantidad limitada de términos. El ajuste numérico consiste en encontrar un polinomio  $P(x)$  que describa el comportamiento del circuito serie RC ante una señal de entrada escalón.

En la solución real se utiliza un osciloscopio convencional para determinar el tiempo de carga del capacitor dado por el término tau " $\tau$ ", cuyo valor numérico en un sistema con entrada escalón es igual a la multiplicación de la resistencia por la capacitancia [4, 5,6]. Se incluye la gráfica proveniente del osciloscopio mostrando el tiempo aproximado  $\tau$ .

Para el desarrollo del modelo numérico se describen los fundamentos de la constante de tiempo  $\tau$ , la selección de puntos para construir el polinomio  $P(x)$  y, se aborda el método numérico para cual es necesario plantear la teoría de diferencias finitas de una función tabular con su polinomio de Newton.

## 2. Desarrollo del Modelo Matemático

La transformada de Laplace y el método de espacios de estados son de las herramientas más utilizados en ingeniería para obtener representaciones del comportamiento de los modelos de estudio [7, 8].

En la presente sección usaremos la transformada de Laplace para determinar el comportamiento del sistema de la figura 1.

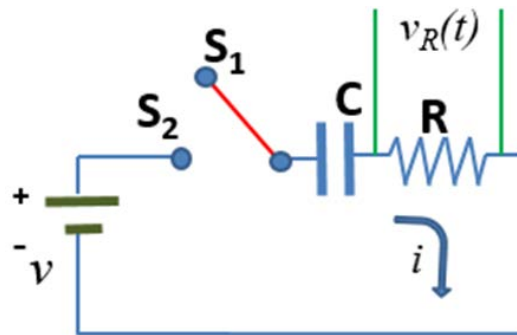


Figura 1 Circuito serie RC.

El circuito serie RC de la figura 1, consta de un voltaje que carga de un capacitor en el cual se ha conectado una resistencia en serie para hacer el proceso de carga/descarga más lento. El conmutador tiene dos posiciones las cuales se describen en la tabla 1.

Tabla 1 Posiciones del conmutador del circuito serie RC.

Estado del interruptor	Acción
S1	C inicialmente descargado
S2	C Cargando a través de I

Inicialmente se considera al conmutador en la posición  $S_1$  e inicialmente descargado, se comienza con el proceso de carga con el interruptor en  $S_2$  para determinar el comportamiento dinámico del sistema en la resistencia es decir  $(v_R(t))$ .

Cuando el interruptor de la figura 1 pasa a  $S_2$  el circuito se cierra y el voltaje en la resistencia  $v_R$  es variante en el tiempo debido al comportamiento de la corriente

“ $i$ ”, además se puede notar que la fuente se comporta como un divisor de voltaje entre el capacitor y la resistencia. La ecuación diferencial 1 describe el comportamiento de la malla.

$$v = \frac{1}{C} \int idt + Ri \quad (1)$$

En la ecuación 1 se puede apreciar el divisor de voltaje de  $v_R(t)$  y además se observa que la incógnita a resolver es la corriente “ $i$ ”. Usando el cambio al dominio de Laplace podemos describir como se muestra en la ecuación 2.

$$v = \frac{1}{C} \int idt + Ri \Rightarrow V_s = \frac{I_s}{CS} + RI_s \quad (2)$$

Factorizando  $I_s$  se observa la ecuación 3.

$$V_s = I_s \left( \frac{RCS + 1}{CS} \right) \quad (3)$$

Por lo que el comportamiento dinámico es dado por la función de transferencia mostrada en la ecuación 4.

$$\frac{I_s}{V_s} = \left( \frac{CS}{RCS + 1} \right) \quad (4)$$

Como  $V_s$  es constante podemos describirlo como se muestra en la ecuación 5.

$$K_v u(t) \Rightarrow \frac{K_v}{S} \quad (5)$$

Donde el valor  $K_v$  representa la magnitud en volts de la fuente, por lo que la función de transferencia está dada por la ecuación 6.

$$I_s = \left( \frac{CS}{RCS + 1} \right) \left( \frac{k_v}{S} \right) = \left( \left( \frac{k_v}{R} \right) \left( \frac{1}{S + \frac{1}{RC}} \right) \right) \quad (6)$$

Una manera de determinar la corriente “i” en el tiempo es aplicando la inversa de Laplace mostrada en la ecuación 7.

$$i(t) = \frac{k_v}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = \frac{k_v}{R} e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (7)$$

Donde  $\tau=RC$  , finalmente las ecuaciones que describen el comportamiento del voltaje en la resistencia y el capacitor son respectivamente mostradas en la ecuación 8.

$$v_R = k_v e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} ; \quad v_C = k_v - k_v e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} = k_v \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}\right) \quad (8)$$

### 3. Desarrollo del Modelo Numérico

La constante de tiempo de un circuito serie RC se designa con la letra tau ( $\tau$ ) cuyas unidades son segundos, la cual se define como [9,10]:

$$\tau = RC \quad (9)$$

Donde la resistencia R es dada en ohms, la capacitancia C en farads y el voltaje de tau es “ $v_\tau$ ” equivalente al 63.2% del voltaje de la fuente como lo muestra la figura 2.

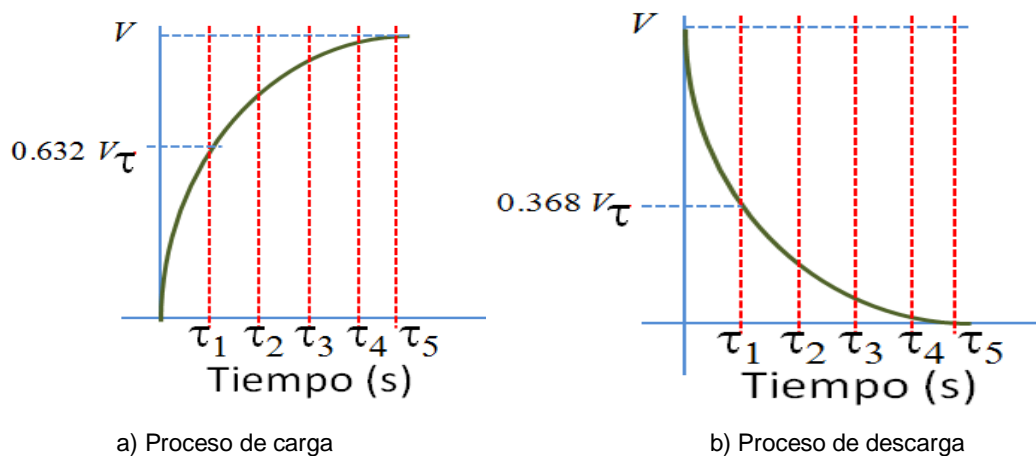


Figura 2 Proceso de carga y descarga de un circuito serie RC.

Se considera que un condensador se carga o descarga totalmente en 5 veces ( $\tau$ ) y que  $\tau$  corresponde a 63.2% de carga o descarga de su capacidad. En la práctica nunca llega al 100 % o al 0% de su carga como puede verse en la tabla 2.

Tabla 2 Correspondencia de  $\tau$  con el proceso de carga y descarga de un circuito serie RC.

Tiempo en $\tau$	Carga en %	Descarga en %
1	63.2	36.8
2	86.5	13.5
3	95.0	5.0
4	98.2	1.8
5	99.3	0.7

Para determinar el polinomio de Newton primero es necesario plantear el concepto de diferencias finitas hacia adelante. Suponga que se parte de una función continua y diferenciable en el intervalo [11, 12], ecuación 10.

$$x_1 \leq x \leq x_{n+1} \tag{10}$$

De la cual se conocen los puntos tabulados  $x$  como se muestra en la tabla 3. Para nuestro estudio usaremos los puntos de la constante de  $\tau$  los cuales fueron descritos en la tabla 1.

Tabla 3 Sistema discreto mostrando correspondencia con la variable  $\tau$ .

x	y=f(x)		Tiempo en $\tau$	Carga en %
$x_1$	$y_1$	$\Rightarrow$	1	63.2
$x_2$	$y_2$		2	86.5
$x_3$	$y_3$		3	95.0
$x_4$	$y_4$		4	98.2
$x_5$	$y_5$		5	99.3

Donde las diferencias hacia adelante se definen como se muestra en la ecuación 11.

$$\Delta^I y_i = y_{i+1} - y_i \tag{11}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Y el  $I$  romano indica que es la primera diferencia hacia adelante, ecuación 12.

$$\begin{aligned} \Delta'' y_i &= \Delta' y_{i+1} - \Delta' y_i \\ i &= 1, 2, 3, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (12)$$

Las diferencias hacia adelante pueden reacomodarse como muestra ecuación 13.

$$\left. \begin{aligned} y_2 &= y_1 + \Delta' y_1 \\ y_3 &= y_1 + 2\Delta' y_1 + \Delta'' y_1 \\ y_4 &= y_1 + 3\Delta' y_1 + 3\Delta'' y_1 + \Delta''' y_1 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} y_2 &= (1 + \Delta) y_1 \\ y_3 &= (1 + \Delta)'' y_1 \\ y_4 &= (1 + \Delta)''' y_1 \end{aligned} \left. \right\} y_{k+1} = (1 + \Delta)^k y_1 \quad (13)$$

Para simplificar la ecuación 13 para  $y_k$  es necesario aplicar una fórmula que proporciona el desarrollo de la potencia de un binomio y, se puede realizar usando el teorema del binomio de Newton

### Binomio de Newton y teorema polinomial

El teorema del binomio (también conocido como el binomio de Newton) es un arreglo mediante la cual se puede escribir el desarrollo de las potencias enteras positivas de un binomio [11], ecuación 14.

$$k! = (1)(2)(3)\dots(k-2)(k-1)k \quad (14)$$

Donde el número de combinaciones de  $k$  elementos tomados en grupos de  $j$  elementos por cada vez viene dado por la ecuación 15.

$$y_{k+1} = \binom{k}{0} y_1 + \binom{k}{1} \Delta' y_1 + \binom{k}{2} \Delta'' y_1 + \binom{k}{3} \Delta''' y_1 + \dots + \binom{k}{k} \Delta^k y_1 \quad (15)$$

La expresión anterior de forma recursiva se puede reescribir como ecuación 16.

$$\binom{k}{j} = \frac{k!}{j!(k-j)!} \quad (16)$$

Y es fácil mostrar que si  $j=0$  tenemos para cualquier  $k$ , ecuación 17.

$$\binom{k}{0} = \frac{k!}{0!(k-0)!} = \frac{k!}{(k)!} = 1 \quad (17)$$

Para reescribir la ecuación  $y_{k+1} = (1 + \Delta)^k y_1$  en términos del binomio del Newton observemos que desarrollando en potencias obtenemos ecuación 18.

$$\begin{aligned}y_2 &= y_1 + \Delta^I y_1 \\y_3 &= y_1 + 2\Delta^I y_1 + \Delta^{II} y_1 \\y_4 &= y_1 + 3\Delta^I y_1 + 3\Delta^{II} y_1 + \Delta^{III} y_1 \\y_5 &= y_1 + 4\Delta^I y_1 + 6\Delta^{II} y_1 + 4\Delta^{III} y_1 + \Delta^{IV} y_1\end{aligned}\tag{18}$$

**Teorema Polinomial Aproximado:** Cuando las diferencias de una función tabulada No se hacen constantes en ningún momento, pero en la *j-ésima* etapa son semejantes, se puede utilizar el polinomio con una aproximación de la función [12]. Para nuestro estudio es necesario realizar la aproximación por medio de un polinomio de grado 4 debido a que contamos con 5 elementos (ver tabla 3).

#### 4. Resultados

A continuación, mostramos los tres casos descritos:

- Modelo real usando un osciloscopio
- Modelo algebraico proveniente de la ecuación 8 de la sección 2
- Modelo propuesto usando el teorema polinomial aproximado de la sección 3

#### Solución del Sistema Real

Para verificar el método propuesto se utilizó el circuito de la figura 3. Donde el valor de la fuente es 5Vcd,  $C=330\mu\text{F}$  y  $R=47\text{k}\Omega$ , por lo que usando la ec. 9 y la tabla 2 se puede determinar que  $\tau = RC \approx 15.15\text{s}$  y  $v_\tau = 0.632 \times 5 = 3.16\text{V}$ .

En la figura 4 se muestra el resultado de laboratorio usando un osciloscopio Fluke 190/C Series, los valores aproximados son:  $\tau \approx 15.6\text{s}$  y  $v_\tau = 3.12\text{V}$ <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> El valor aproximado depende de la sensibilidad de cada equipo

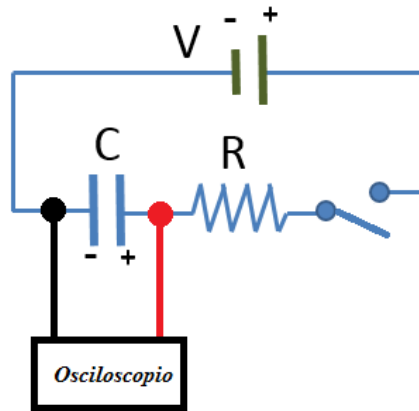


Figura 3 Circuito serie RC con Osciloscopio.

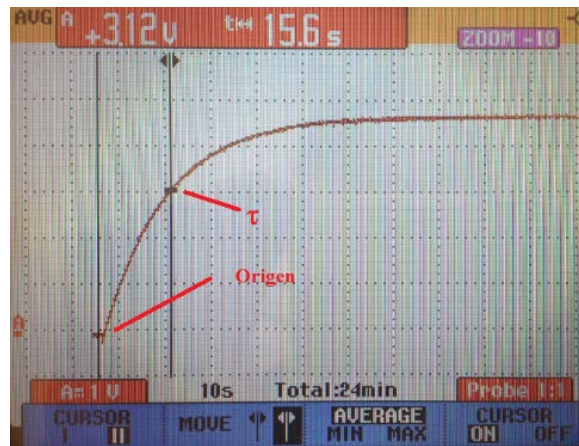


Figura 4 Comportamiento del circuito serie RC usando el Osciloscopio.

### Solución del Sistema Algébrico

Se utilizó el modelo matemático de la ecuación 8 para determinar de forma algebraica el voltaje en el capacitor, ecuación 19.

$$v_C = 5 \left( 1 - e^{\left( \frac{-t}{15.15} \right)} \right) \quad (19)$$

Para comprobar los resultados se usó el sistema real, donde las gráficas obtenidas se muestran en la figura 5. Para sobreponer el modelo real se usó la base de datos directamente del osciloscopio.



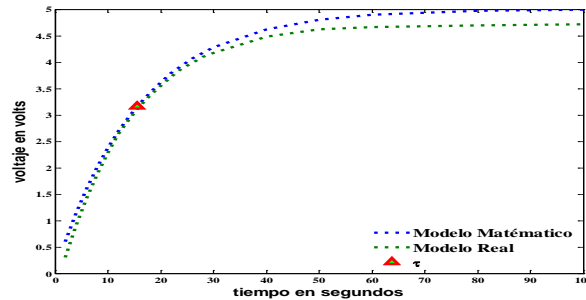


Figura 5 Comparación del circuito serie RC del modelo matemático y el modelo real.

En la figura 5 se observan los siguientes comportamientos:

- El modelo matemático alcanza el valor de la fuente (5vcd) mientras el modelo real no alcanza el valor nominal
- El valor nominal en el modelo real es alcanzado en un tiempo infinito, mientras en el modelo matemático en  $5\tau$
- La constante de tiempo  $\tau$  se ubica en el mismo punto para ambos sistemas
- Los modelos se empiezan a separar a partir de la constante de tiempo  $\tau$

### 4.3 Solución del Sistema usando Ajuste Numérico

Los métodos numéricos son ampliamente usados en ingeniería para escribir el comportamiento de los sistemas [13,14]. En esta sección se usa el modelo para el modelo numérico los cinco puntos conocidos de  $\tau$  como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 Puntos utilizados para determinar el modelo polinomial.

Tiempo en múltiplos de $\tau$	Tiempo (s)	Voltaje Aproximado (V)
1	15.51	3.1606
2	31.02	4.3233
3	46.53	4.7510
4	62.04	4.9084
5	77.55	4.9663

Usando el teorema polinomial aproximado y, al tener cinco tiempos de estudio podemos aproximar el sistema por un polinomio de grado cuatro, ecuación 20.

$$y = F(x) = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 \quad (20)$$

Donde ( $b_0, b_1, b_2, b_3$  y  $b_4$ ) son incógnitas a resolver por medio de ecuaciones 21.

$$\begin{aligned}
 b_0 + 15.51b_1 + (15.51)^2 b_2 + (15.51)^3 b_3 + (15.51)^4 b_4 &= 3.1606 \\
 b_0 + 31.02b_1 + (31.02)^2 b_2 + (31.02)^3 b_3 + (31.02)^4 b_4 &= 4.3233 \\
 b_0 + 46.53b_1 + (46.53)^2 b_2 + (46.53)^3 b_3 + (46.53)^4 b_4 &= 4.7510 \\
 b_0 + 62.04b_1 + (62.04)^2 b_2 + (62.04)^3 b_3 + (62.04)^4 b_4 &= 4.9084 \\
 b_0 + 77.55b_1 + (77.55)^2 b_2 + (77.55)^3 b_3 + (77.55)^4 b_4 &= 4.9663
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Cuyo resultado es el polinomio interpolado, ecuación 22.

$$P(x) = -2.1145x10^{-7} t^4 + 5.3549x10^{-5} t^3 - 0.0052t^2 + 0.2404t + 0.5046
 \tag{22}$$

Para validar el polinomio de la ecuación 22 se grafica el modelo matemático junto con la solución numérica como se observa en la figura 6.

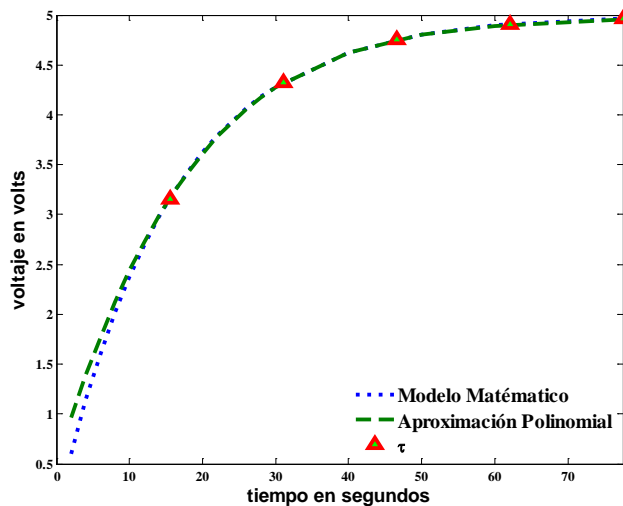


Figura 6 Circuito serie RC con Osciloscopio.

En la figura 6 se compara el modelo matemático con una aproximación polinomial de cuarto grado y, se indican los valores de  $\tau$  usados para formar el polinomio  $P(x)$ .

## 5. Discusión

Como se observa en la ecuación 22 los términos de 4to y 3er orden son pequeños en comparación con el resto de los demás coeficientes, por lo que de manera intuitiva se podría simplificar la expresión a una ecuación de orden 2.

Esto hace suponer que la carga y descarga de un circuito serie RC tiene un comportamiento de segundo grado una forma reducir el grado del polinomio podría ser aplicando el teorema siguiente.

**Teorema Polinomial Exacto:** Si las  $j$ -ésimas diferencias de los puntos de una función tabulada con espaciamentos constantes son iguales, entonces dichos datos corresponden a un polinomio de grado  $j$ .

Como se observa en la tabla 5 al realizar las diferencias finitas de primer orden hacia adelante se vuelven constantes en  $\Delta^I$  y las de segundo orden  $\Delta^{II}$  son cero.

Usando el teorema para espaciamentos constantes podemos deducir que un polinomio de grado dos debería ser suficiente para aproximar el comportamiento de carga de un circuito serie RC.

Tabla 5 Diferencias finitas hacia adelante.

Tiempo en $\tau$	Tiempo en segundos	$\Delta^I$	$\Delta^{II}$
1	15.51		
		7.755	
2	31.02		0
		7.755	
3	46.53		0
		7.755	
4	62.04		0
		7.755	
5	77.55		

## 6. Conclusiones

En el presente artículo se desarrolla un modelo numérico basado en los puntos conocidos de  $\tau$  de un circuito serie RC con el de diferencias divididas de Newton. Se ilustran ejemplos numéricos y se demuestra la habilidad para extraer el comportamiento del sistema. Se comparan las soluciones algebraicas y el modelo polinomial por medio de una expresión de cuarto grado.

Algunos temas para trabajo futuro son realizar la comparación de los valores de las gráficas del modelo real con la Aproximación Polinomial, al usar los datos reales en vez de las soluciones algebraicas en las diferencias finitas los términos no se hacen constantes  $\Delta^{II}$ , por lo que hace más interesante el análisis de simplificación de segundo orden.

## 7. Bibliografía y Referencias

- [1] I. D. Kim, E.-C. Nho, B. K. Bose, "A new snubber circuit for multilevel inverter and converter". Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE. Volumen 2. 1998. Pp. 1432 – 1439.
- [2] C. Weiyun, D. Daohong, "Research on a novel active snubber circuit", Power Electronics and Variable Speed Drives, 1996. Sixth International Conference on. No. 429. 1996.Pp. 60 – 64.
- [3] G. Morales, Análisis de circuitos eléctricos en DC: nueva metodología de enseñanza. ISBN 9681865448. 2005. Editorial Limusa. México. Pp. 453.
- [4] L. Vandenberghe, S. Boyd, A. El Gamal, "Optimizing dominant time constant in RC". circuits IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. Volumen 17. Issue 2. 1998. Pp. 110 – 125.
- [5] C. Ouffoue, V. Nguyen, C. Jabbour, H. Fakhoury, P. Loumeau, "A low power RC time constant auto-tuning circuit for RC-integrators in high linearity continuous-time delta sigma modulators". New Circuits and Systems Conference (NEWCAS), IEEE 10th International. 2012. Pp. 281-284.
- [6] M. Nahvi, J.A. Edminister, P. M. Rodríguez, Circuitos eléctricos y electrónicos. 4ta edición. 2005. McGraw-Hill. México. ISBN 8448145437. Pp. 528.
- [7] I. Martínez, C. Juárez, "Modelado de un Sistema Máquina Bus Infinito Usando Transformada de Laplace". *Pistas educativas*. Octubre 2015. ISSN 1465-1249.
- [8] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna. 4ta edición. Prentice Hall. Madrid. ISBN 0-13-060907-2. Pp. 973.
- [9] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, Electronic Devices and Circuit Theory. 2009. Pearson/Prentice Hall, USA. ISBN 0135026490. Pp. 849.
- [10] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, Electricidad, Electrónica y Electromagnetismo. 1993. Trillas. México. ISBN 968-24-4335-0. Pp. 650.
- [11] A. Robles del Peso, J. García Benedito, Métodos Numéricos en Ingeniería. Prácticas con Matlab. Universidad de Oviedo. ISBN 13-978-84-8317-563-7. Pp.163.

- [12] J. M. Izar Landeta, *Elementos de Métodos Numéricos para Ingeniería*. Universidad Autónoma del San Luis Potosí. México ISBN 968-7674-45-8. Pp. 225.
- [13] N. J. Pacheco, C. Juárez, I. Martínez “Análisis Dinámico de la Estabilidad Usando Interpolación de Alto Orden”. Para Ingeniería Investigación y Tecnología de la UNAM. Volumen 13. Octubre 2012. ISSN 1405-7743. Pp. 451-460.
- [14] I Hernández, C. Juárez, I Martínez, “Interpolación polinomial para determinar el tiempo de tratamiento criogénico para acero AISI D2 en medio básico”. *Pistas educativas*. octubre 2015. ISSN 1465-1249.

## **8. Autores**

Dr. Carlos Juárez Toledo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y 2008 respectivamente, desarrollo una estancia doctoral en el departamento de Eléctrica y Computación de NU, Boston, Massachussets en 2005 y una estancia posdoctoral en la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la UNAM en 2008-2009. Actualmente es profesor de tiempo completo en la UAEMex.

Dra. Irma Martínez Carrillo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y 2008 respectivamente, Ganadora de los certámenes nacionales de tesis en el área de Informática y Control a nivel Maestría y Doctorado en 2005 y 2009. Actualmente es profesora de tiempo completo en la UAEMex.

# **CARACTERIZACIÓN DE LÁSERS DE BAJA POTENCIA PARA UN SISTEMA DE GRABADO**

## ***Fabian Espinoza Maldonado***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
*al114123@alumnos.uacj.mx*

## ***Abimael Jiménez Pérez***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
*abimael.jimenez@uacj.mx*

## ***José Rurik Farías Mancilla***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
*rurik.farias@uacj.mx*

## ***Ángel Saucedo Carbajal***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología  
*angel.sauceda@uacj.mx*

## ***J. Antonio Muñoz Gómez***

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ingenierías  
*jose.munoz@cucsur.udg.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se realiza la caracterización de un diodo láser que emite en la longitud de onda de 405 nm con potencias de emisión de 150 y 200 mW. El láser es integrado en una máquina CNC de dos grados de libertad, diseñada para analizar el grabado en diferentes materiales. Se obtienen los principales parámetros del diodo láser tales como: corriente de polarización, potencia óptica, corriente de umbral, espectro de emisión y punto focal. Al integrar el diodo láser en el sistema de posición *xy*, se caracteriza la velocidad y el ancho de la línea de grabado sobre diferentes materiales obteniendo resultados satisfactorios.

**Palabra(s) Clave(s):** Arduino, GRBL, Láser, Espectrografía, Óptica.

## 1. Introducción

La palabra “LASER” es un acrónimo que significa “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*”. Los láseres se utilizan en una gran gama de aplicaciones desde reproductores de CD, corte industrial hasta tratamientos médicos. La luz generada por láser tiene dos características particulares, ser coherente y monocromática. La coherencia de la luz hace referencia a todas las ondas que conforman el haz de luz, éstas se encuentran relacionadas en fase una con otra, tanto en tiempo como en espacio. La monocromía de la luz se describe como un ancho de banda espectral excepcionalmente estrecho, cercano a 10 nm - 0.01 nm para láseres de aplicación específica [1].

La emisión de luz a nivel atómico se puede explicar a través del modelo atómico de Bohr. El electrón solo puede tomar valores de energía correspondientes a las órbitas fuera del núcleo, en ellas el electrón no emite energía. Únicamente cuando los electrones cambian de orbita, se produce la emisión de partículas subatómicas conocidas como fotones. La luz puede ser considerada como un fenómeno ondulatorio o como un flujo de fotones (naturaleza dual).

Los fotones se pueden caracterizar por su frecuencia y su energía a través de las ecuaciones (1) y (2).

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\nu$  es la frecuencia,  $c$  es la velocidad de la luz y  $h$  es la constante de Planck [2]. La  $\lambda$  del fotón dentro del espectro electromagnético visible se mide en nanómetros (nm) y se encuentra en el rango de 390 a 750 nm [3].

### Absorción, emisión espontánea y estimulada

En el modelo atómico, los electrones sólo pueden girar en ciertas órbitas alrededor del núcleo llamadas niveles de energía. La energía cinética del electrón equilibra exactamente la atracción electrostática entre las cargas opuestas del

núcleo (+) y los electrones (-) [4]. Los saltos de los electrones entre niveles de energía dan como resultado la absorción o la emisión de un fotón. La absorción de un fotón se presenta cuando un electrón pasa de un estado de energía inferior  $E_v$  (banda de valencia) a un nivel más alto  $E_c$  (banda de conducción), tal como se ilustra en la figura 1A. La emisión espontánea ocurre de forma contraria, cuando un electrón cambia su energía de  $E_c$  a  $E_v$ , emitiendo un fotón como se observa en la figura 1B. La emisión estimulada se presenta cuando el átomo se encuentra en su estado excitado y un fotón incide sobre él, como resultado de esta interacción su energía disminuye, emitiendo un segundo fotón que tiene las mismas características de dirección y fase que el fotón inicial. Una descripción gráfica de este proceso se muestra en la figura 1C.

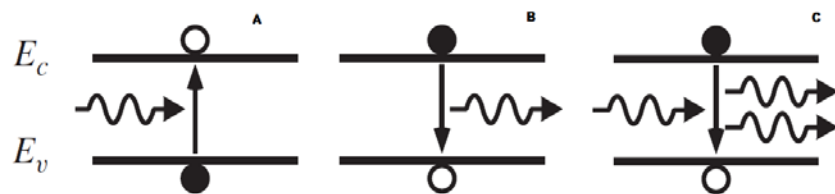


Figura 1 Absorción, emisión espontánea y estimulada en un láser.

### Principio de funcionamiento del diodo láser

Un láser de semiconductor o diodo láser, se compone de tres elementos básicos que son: la región activa, la cavidad de resonancia y el método de bombeo; es necesario el funcionamiento de los tres elementos en conjunto para lograr la emisión láser. En la figura 2 se muestra la estructura típica de un diodo láser.

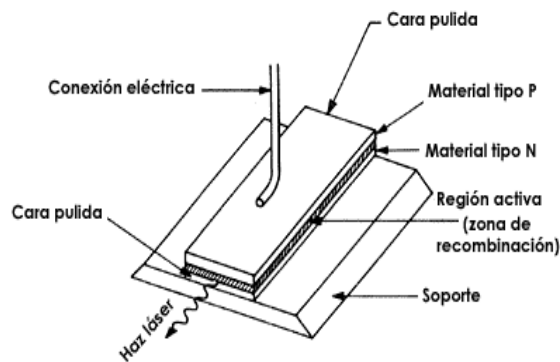


Figura 2 Estructura típica de un diodo láser. [3]



Los diodos láser utilizan uniones P-N de Arsenuro de Galio u otros semiconductores para generar acción láser. La luz emitida se caracteriza por ser coherente y monocromática [5]. El método de bombeo se obtiene al polarizar la unión, aplicando una corriente mayor en el material P con respecto al material N. Esto genera una diferencia de energía entre los niveles  $E_c$  y  $E_v$  del ancho de banda del semiconductor ( $E_g$ ), que es capaz de separar espacialmente electrones y huecos [6]. Dado que los huecos son la ausencia de electrones en los enlaces atómicos, los electrones tienden a recombinarse con los huecos en la región activa del semiconductor. La recombinación tiene como resultado la emisión de fotones [4].

Para alcanzar la amplificación de la luz se utiliza la cavidad resonante, confinando la región activa entre ambas caras de la unión P-N. Éstas se encuentran altamente pulidas, con el fin de reflejar la luz emitida. Como resultado, los fotones se multiplican y alcanzan mayores intensidades de emisión. La inversión de población en el medio activo es una precondition para que se efectúe la acción del láser, lo cual permite que exista una mayor concentración de electrones en  $E_c$  que en  $E_v$ .

### **Interacción de la luz con la materia**

La absorción óptica a nivel macroscópico es el fenómeno en el cual los materiales atenúan cualquier onda electromagnética que pasa por ellos. A nivel atómico el material contiene más electrones en  $E_v$  que en  $E_c$ , por tal motivo predomina la absorción [8]. Este fenómeno solo ocurrirá cuando la energía del fotón, coincida con el  $E_g$  del material. De tal manera que, la energía de los fotones incidentes pueda elevar el nivel energético de los átomos. En un material no transparente la energía lumínica (flujo de fotones) se transforma en energía térmica, llevando a los átomos que la conforman a un estado de mayor vibración. A nivel macroscópico este fenómeno se traduce en un aumento de la temperatura del material donde está incidiendo la luz. La alta concentración de la luz en un punto puede causar la incineración del material.

## **Sistema de grabado**

Para mecanizar una pieza con el fin de marcarla; normalmente, se utiliza un sistema de coordenadas rectangulares de dos dimensiones  $xy$ , las cuales especifican el movimiento de la herramienta de grabado (el diodo láser). En el mercado estos sistemas utilizan mayoritariamente láseres de  $CO_2$  pues poseen altas potencias de emisión; sin embargo, el costo es muy elevado y dichos sistemas son viables solo para procesos industriales [7].

Si se utilizan diodos láser con menores potencias (150 – 300 mW) es posible obtener sistemas de grabado a bajo costo [8]. El sistema de grabado con diodos láser permite realizar diferentes grabados y cortes en diferentes materiales, los cuales pueden ser utilizados en trabajos artesanales con las ventajas del bajo costo, menor tiempo de maquinado y mayor precisión [9].

Los movimientos en el plano  $xy$  están controlados por dos motores a pasos, con un tornillo sin fin montado en el eje motriz de cada motor. La pieza a mecanizar se sujeta al eje  $y$ , mientras que en el eje  $x$  se coloca el láser. De esta manera, el movimiento coordinado de ambos ejes logra el trabajo deseado en la pieza. Los desplazamientos de los ejes se realizan indicando las coordenadas de la posición a alcanzar en el plano  $xy$ ; además, permite controlar la velocidad de avance hasta la posición deseada y al mismo tiempo controlar el encendido y apagado del láser. El sistema es controlado con la plataforma de Arduino y el control numérico computarizado (CNC) a través de una tarjeta CNC shield compatible con Arduino. El lenguaje de programación estándar para el maquinado por CNC es el código G. El Firmware GRBL es el encargado de procesar cada línea de código de un programa de maquinado, para que el sistema ejecute los movimientos necesarios al realizar una rutina de trazado, haciendo posible el grabado de diferentes figuras con velocidades, determinadas en mm/seg. La velocidad de trabajo para el grabado, estará en función de las características del material a trabajar, siendo fundamental la composición del material.

En la sección de desarrollo se describe el procedimiento realizado para caracterizar los diferentes parámetros del láser y el sistema de grabado. Posteriormente, en la sección de resultados se exhibe la información obtenida de

las diferentes etapas de caracterización y, finalmente, en la sección de discusión se analizan los principales resultados.

## 2. Desarrollo

Para caracterizar el diodo láser fueron necesarias diferentes técnicas de medición y equipo de laboratorio pero también fue necesario integrar los sistemas mecánicos, electrónicos y ópticos en el sistema de posicionamiento  $xy$ .

### Sistema de posicionamiento

El componente mecánico principal para un sistema de posición  $xy$  recae en el diseño mecánico de los ejes. Para tal efecto, se diseñó y construyó un sistema de posicionamiento lineal basado en el movimiento angular de un motor a pasos, el cual se caracteriza por tener una elevada capacidad de posicionamiento. Este motor es capaz de avanzar una cantidad de grados conocidos como pasos, dependiendo de sus entradas de control. El eje diseñado para el sistema de grabado se muestra en la figura 3. Como se aprecia, las piezas que soportan a los ejes y la cama de desplazamiento lineal fueron diseñadas e impresas en 3D con un polímero de tipo ABS. Al final del eje se cuenta con un sensor óptico que actúa como un cero físico que permite posicionar de manera automática el eje al inicio de cada movimiento. Este sistema de posicionamiento conforman tanto al eje- $x$  como al eje- $y$ . Sobre el primer eje se ajustó un diodo láser, obteniendo así, una máquina CNC con dos grados de libertad.

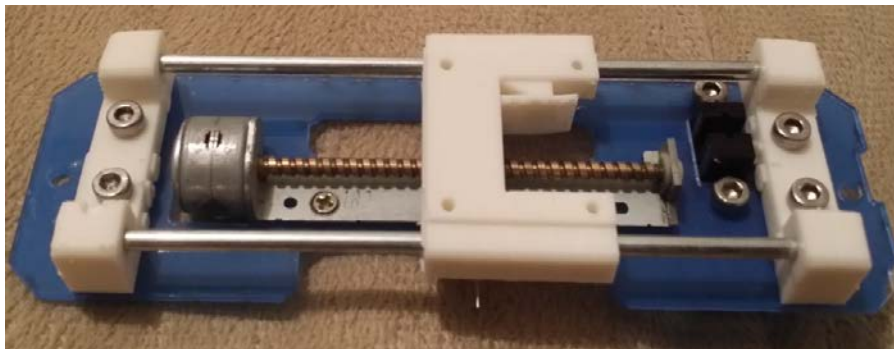


Figura 3 Eje motriz con motores a pasos.

Para utilizar los motores a pasos, se requiere un circuito de control y comunicación que permita enviar datos referentes a su posición y velocidad. En el sistema de grabado se utilizó la tarjeta controladora de código abierto CNC Shield. Ésta suministra los voltajes de alimentación a los motores (12-36 V) de corriente directa; además, cuenta con espacio para el control numérico individual de los dos ejes. El control de micro-pasos para los motores a pasos es realizado por medio del controlador A4988. Este controlador de motor a pasos es frecuentemente empleado en máquinas de impresión 3D.

El diagrama del sistema de grabado completo se muestra en la figura 4. Dentro de este sistema, es posible distinguir cinco circuitos principales; dos circuitos de control para motores a pasos (A4988), la etapa de potencia (tarjeta CNC Shield), el circuito de comunicación (Arduino) y el controlador de corriente del diodo láser. Cabe señalar que el sistema completo conforma una máquina CNC llamada LaserBot<sup>MR</sup> que estará disponible en el mercado el próximo año.

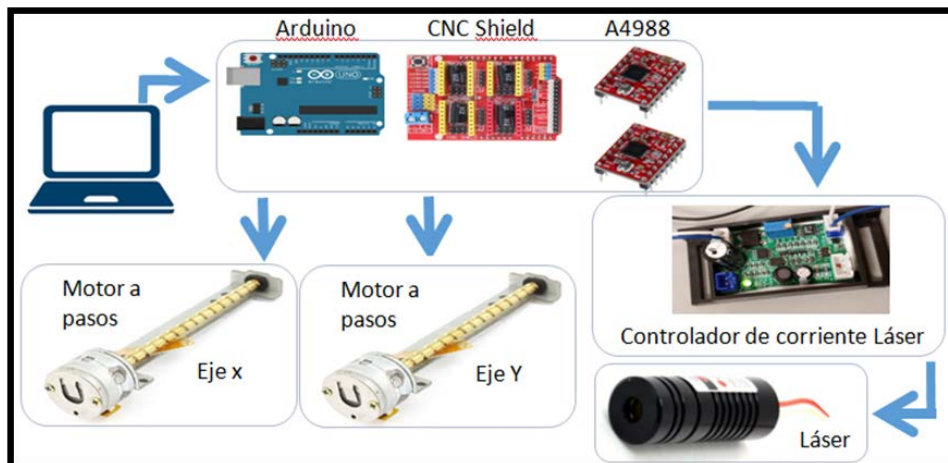


Figura 4 Elementos principales del sistema de grabado láser.

### Controlador de corriente y modulo láser

Este controlador gestiona la corriente de entrada (la fuente de electrones) y, de esta manera, se controla la potencia óptica ( $P$ ) de salida del diodo láser. El circuito de control debe cumplir con la especificación de la corriente de polarización del láser recomendada por el fabricante. La corriente de polarización máxima de los diodos láser utilizados debe ser menor a 300 mA. Las especificaciones del

controlador que se muestran en la tabla 1, indican que el circuito se puede utilizar en diodos láser con potencia óptica en el rango de 50 a 200 mW. El ajuste del nivel de corriente se realiza a través de un potenciómetro. Este circuito también tiene la opción de interrumpir o habilitar la acción del láser a través de una señal de control TTL (0 - 5V).

Tabla 1 Especificaciones del controlador de corriente para el diodo láser.

Especificaciones del controlador de corriente
Alimentación 12 V, CD
Indicador LED ON-OFF
Entrada de control TTL
Ajuste de corriente con potenciómetro
Salida de alimentación láser 3-5 V
Salida de alimentación ventilador 12 V

El fabricante establece las siguientes especificaciones del diodo láser: radiación de la luz en el rango del color azul ( $\lambda = 405 \text{ nm}$ ), voltaje de alimentación de 3 a 5 V, corriente de polarización (<300 mA) y potencias ópticas de 150 mW y 200 mW. El módulo de los diodos láser se muestra en la figura 5, el cual tiene las siguientes dimensiones: 44.12 mm de largo y 15.13 mm de diámetro. El módulo funciona como soporte y disipador de temperatura del diodo láser. También posee un sistema de ajuste con una lente para enfocar el haz de luz y concentrar toda la energía en un punto.



Figura 5 Módulo láser de 405 nm con lente para ajuste de enfoque.

## Caracterización del láser

Si un conjunto de rayos paralelos atraviesan una lente, en una determinada distancia focal, los rayos convergerán en un punto. La distancia entre el centro de la lente y el punto focal se conoce como la distancia focal de la lente, tal y como se muestra en la figura 6. El diámetro mínimo de concentración está determinado por  $\lambda$ , la divergencia del haz y las características de la lente [3].

La estructura típica del diodo láser es rectangular (ver figura 1). Por ende, la abertura de la unión tiene esa forma y el rayo de emisión tiene un perfil espacial rectangular [10]. Con el fin de cambiar el perfil espacial para que éste sea circular y, de esta manera, enfocar toda la luz emitida en un punto, se utiliza un lente astigmático y biconvexo. Las propiedades de este tipo de lentes, aproximan el perfil espacial a un óvalo; por lo tanto, se logra enfocar la luz en un punto redondo. Con el uso de este tipo de lentes surge otra problemática; el lente refracta la luz que incide en él desviándola de su curso. La luz refractada sigue su curso en línea recta y converge en el punto focal, a una distancia determinada, figura 6.

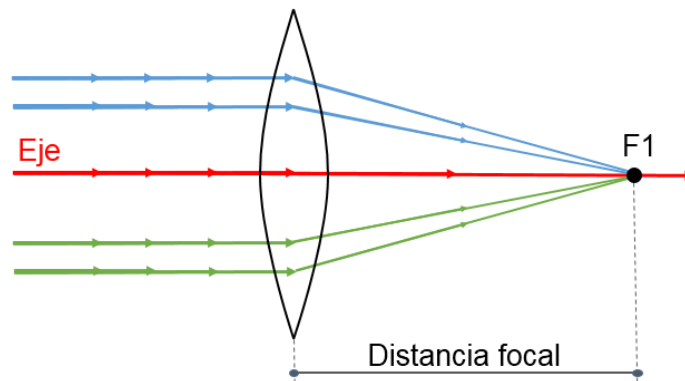


Figura 6 Descripción del funcionamiento de un lente astigmático y biconvexo.

En el primer prototipo del sistema LaserBot<sup>MR</sup> fue complicado enfocar el haz de luz a una distancia de 7 cm, altura que originalmente había entre la lente del módulo láser y la superficie de trabajo. Por lo que fue necesario realizar pruebas de enfoque sobre una base de altura variable hasta encontrar la distancia focal de la lente en 9 cm. Una vez enfocado el haz de luz se hizo incidir sobre la superficie de algún material para grabarlo. El efecto del haz sobre el material puede ser incineración, vaporización o reacción fotoquímica [11].

Para realizar el estudio del parámetro  $P$  en función de la corriente de polarización se utilizó la configuración mostrada en la figura 7. El medidor ThorLabs PM320E es un equipo que mide la potencia y energía óptica [12]. Este equipo utiliza un sensor Thorlabs S130C basado en un fotodiodo que capta el haz de luz láser con potencias entre 5 mW y 500 mW. Para realizar la medición hay que hacer incidir el haz de luz láser sobre la abertura del sensor. Se midió la potencia de emisión de dos diodos láser de 150 mW y 200 mW, respectivamente. Como resultado, se obtuvo la gráfica de  $P$  en función de la corriente de polarización del diodo láser.

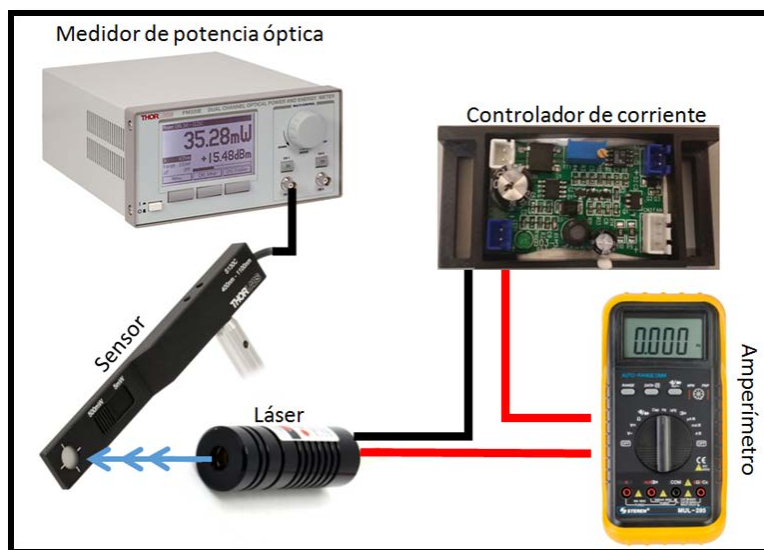


Figura 7 Configuración para medir la potencia óptica del láser.

El espectro de emisión del láser, es la medida de la distribución espacial de la energía. Este análisis nos permite obtener parámetros importantes del haz como la longitud de onda media, la distribución espectral y la intensidad pico. Para realizar esta caracterización se utilizó la configuración mostrada en la en la figura 8. Primero el haz del diodo láser se incidió sobre un divisor de haz con el fin de atenuar la potencia óptica que recibe el sensor. Después, el rayo reflejado se apuntó hacia una lente que se conectó por fibra óptica al espectrómetro ThorLabs CCS200 [13]. Como resultado se obtuvo la gráfica de  $\lambda$  en función de la intensidad de la luz.



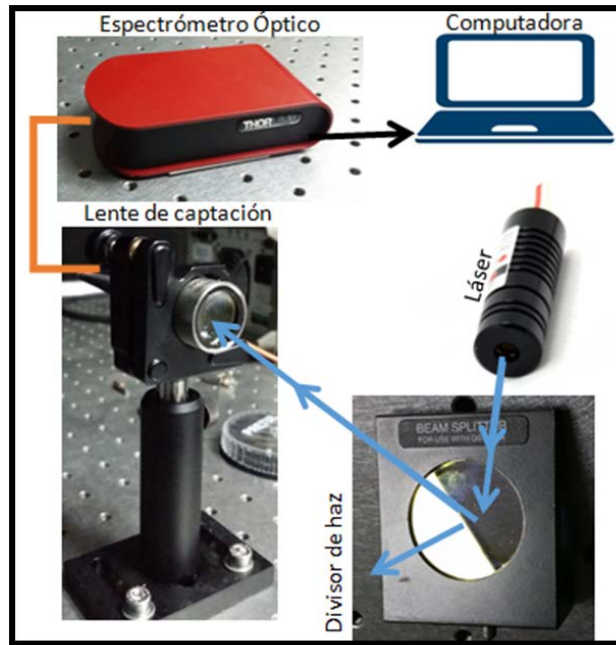


Figura 8 Configuración para medir el espectro de emisión del láser.

### Caracterización del sistema de grabado

El sistema se caracterizó grabando diversos materiales con potencias de 150 y 200 mW, utilizando diferentes velocidades de desplazamiento en mm/seg. Un material blanco refleja más la luz debido a su bajo espectro de absorción pero un objeto con color definido muestra una mejor absorción óptica, porque solo es capaz de reflejar una porción del espectro de la luz que incidió en él. Por otro lado, materiales con color negro absorben todas las longitudes de onda del espectro visible; por lo que, incidir el haz de luz sobre un material oscuro se tiene mayor eficiencia con la desventaja de que la marca del grabado con láser es oscura.

### 3. Resultados

Se determinó que tanto el diodo láser de 150 mW como el de 200 mW tienen una corriente de umbral ( $i_{th}$ ) de 25 mA, con un punto no focalizado, apenas perceptible para el ojo humano. La aparición de un punto focalizado con tonalidades azules fue a partir de 100 mA donde se observó una ligera ablación en la mayoría de los materiales caracterizados.



La gráfica de  $P$  en función de la corriente de polarización para el láser de 200 mW se muestra en la figura 9, donde se observa una característica lineal de la emisión del diodo. Es decir, el aumento o reducción de la corriente de polarización generará un incremento o disminución de  $P$ . Un aspecto importante es que la concentración de la luz en un solo punto no aumenta el valor de  $P$ , solo crea una concentración mayor de energía.

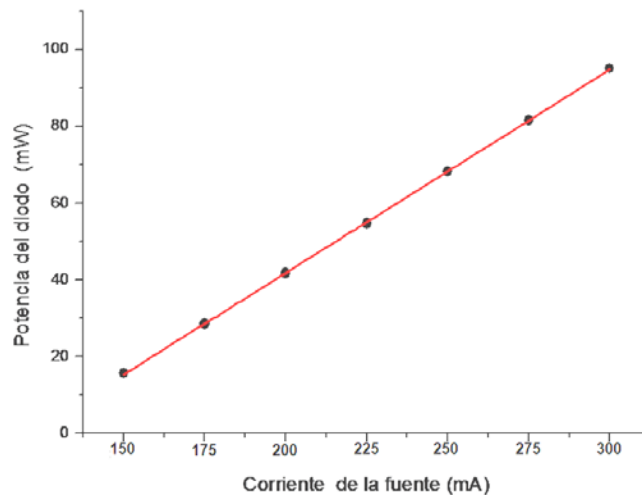


Figura 9 Potencia en función de la corriente para un diodo láser de 200 mW.

Los resultados de la medición del espectro de emisión nos ayudaron a determinar la  $\lambda$  de emisión láser en función de la intensidad. La medición realizada utiliza un sistema capaz de detectar longitudes de onda en el rango de 350 a 700 nm con una precisión cercana a 0.5 nm. En la figura 10 se observa que el diodo láser de 200 mW, presenta una  $\lambda$  media de 408 nm con un ancho de banda espectral que cambia de acuerdo a la corriente de polarización del diodo láser. En el punto de máxima corriente (300 mA) el ancho de banda espectral abarcó desde los 403 hasta los 412 nm (ancho de 9 nm). Los resultados de la medición del espectro fueron muy similares para el caso del láser de 150 mW.

La caracterización del grabado se realizó trazando cuadrados y utilizando diferentes materiales. La figura 11 muestra los resultados con madera, en la cual se utilizaron tres diferentes corrientes de polarización del láser (200, 250 y 300 mA) y seis diferentes velocidades de trazado (20, 40, 60, 80, 100 y 120 mm/s). En

todos los materiales se observó la misma tendencia, a mayor velocidad de trazado menor efecto de grabado y/o corte.

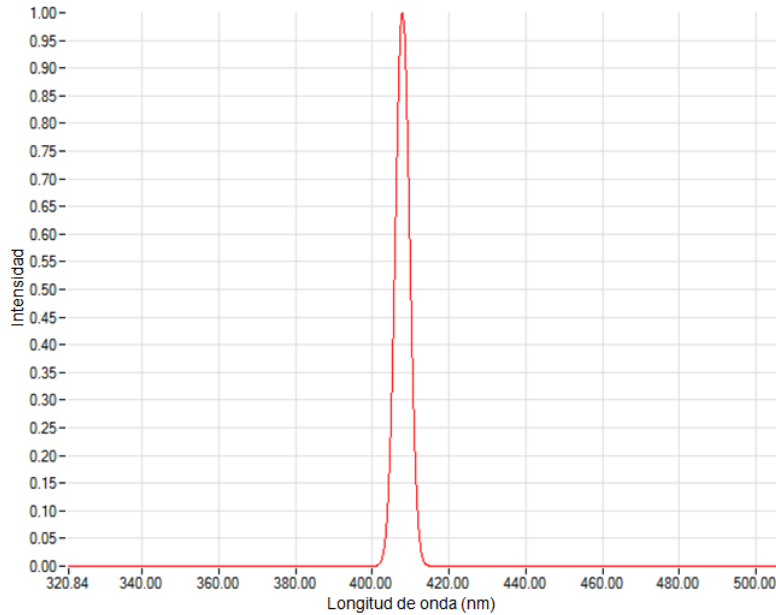


Figura 10 Medición espectral de emisión láser para láser de 200 mW.

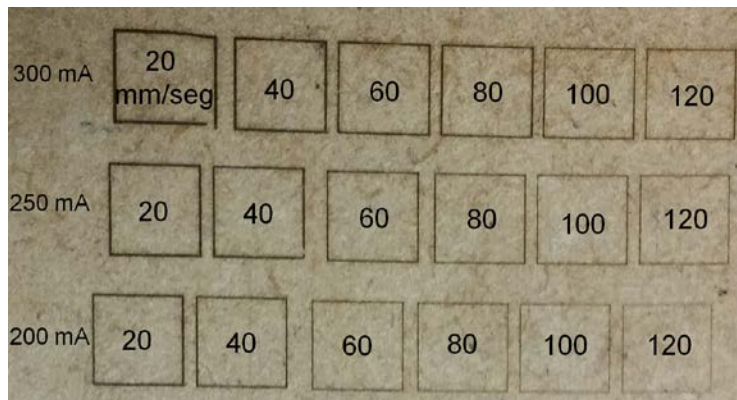


Figura 11 Grabado en madera láser de 200 mW diferentes corrientes de polarización.

El procedimiento de la figura 11 se realizó sobre diversos materiales, en las tablas 2 y 3 se muestran los resultados utilizando el diodo láser de 150 mW y 200 mW, respectivamente. Fue posible observar que en algunos materiales; además del grabado es posible realizar cortes finos. Sin embargo, para cada material la velocidad y la corriente de polarización del diodo láser, produce resultados

diferentes. El objetivo de este estudio fue determinar la corriente de polarización y la velocidad de trazado ideales para cada material.

Tabla 2 Relación de materiales grabados y cortados con el láser 150 mW.

Material	Grabado	Corte	Velocidad de corte mm/min
Cartón corrugado	✓		
Cartón corrugado naranja	✓	✓	20, 40
Madera	✓		
Madera de aserrín	✓		
Etilvinilacetato blanco (foamy)			
Etilvinilacetato azul (foamy)	✓	✓	20
Cartulina azul	✓		
Fieltro blanco			
Fieltro naranja	✓	✓	20
Papel Amarillo	✓	✓	20
Papel Blanco			
Chocolate	✓		
Cobre			

Tabla 3 Relación de materiales grabados y cortados con el láser 200 mW.

Material	Grabado	Corte	Velocidad de corte mm/min
Cartón corrugado	✓		
Cartón corrugado naranja	✓	✓	20, 40, 60
Madera	✓		
Madera de aserrín	✓		
Etilvinilacetato blanco (foamy)			
Etilvinilacetato azul (foamy)	✓	✓	20, 40, 60
Cartulina azul	✓		
Fieltro blanco	✓		
Fieltro naranja	✓	✓	20, 40, 60, 80
Papel Amarillo	✓	✓	20, 40, 60, 80, 100
Papel Blanco	✓	✓	20, 40, 60, 80, 100

Finalmente, con ayuda de un microscopio digital se realizó la medición del espesor de la línea de grabado del diodo láser, para ello se utilizaron algunas de las muestras obtenidas en las tablas 2 y 3. En la figura 12 se observa cómo se utilizó un software que aproxima la distancia entre un punto y otro para determinar el espesor promedio de 0.006 pulgadas = 152µm para el caso específico de una velocidad de grabado de 20 mm/seg sobre madera.

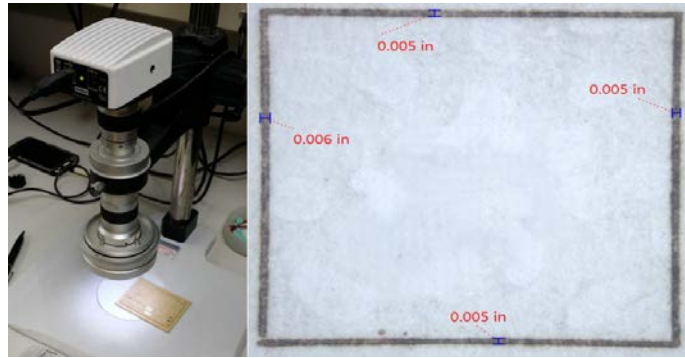


Figura 12 Medición del ancho de la línea de grabado.

#### 4. Discusión

Los valores experimentales de la potencia óptica del láser difieren de manera importante con las especificaciones del fabricante. Los diodos láser no alcanzaron las potencias de emisión especificadas por el fabricante (150 y 200 mW); solo se logró obtener las potencias máximas de 83 y 95 mW con la corriente de polarización más alta de 300 mA. Esto es entendible considerando que los diodos láser son de bajo costo y manufacturados en China. Si en el sistema de grabado se utilizan diodos láser con especificaciones más controladas o con mayores potencias de emisión, se aumentaría el costo del sistema y el peso del diodo láser, ya que, para potencias mayores a 300 mW es inherentemente necesario un sistema de disipación de temperatura.

Sin embargo, la  $\lambda$  de emisión láser en función de la intensidad demuestra que para ambos diodos láser, la  $\lambda$  media fue de 408 nm (muy cercana a los 405 nm) con un ancho de banda espectral de 9 nm.

Es importante observar que la velocidad con la que los portadores se inyectan en un diodo láser se determina por la corriente de polarización y no por el potencial. Por lo tanto, existe una fuerte relación entre la corriente que fluye por el diodo y el valor de  $P$  emitido. Ambos diodos láser, esencialmente, no generaron potencia óptica cuando la corriente de polarización fue menor a  $i_{th} = 25$  mA y, para valores mayores a  $i_{th}$ ,  $P$  se incrementó proporcionalmente con el valor de la corriente. Implementar el sistema con un punto focal de 7 cm no fue posible debido a las

limitantes del sistema de enfoque del diodo láser (Resorte y lente). Por lo tanto, el punto focal óptimo se encontró en 9 cm.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se analizaron los parámetros de corriente de polarización, potencia óptica, corriente de umbral, espectro de emisión y punto focal de un diodo láser de 405 nm con potencias de 150 y 200 mW. Para el análisis de la velocidad y ancho de la línea de grabado se planteó integrar estos dispositivos de emisión azul en una máquina CNC de dos grados de libertad. Los valores experimentales del parámetro de la potencia óptica difieren de manera importante con las especificaciones del fabricante en ambos diodos. Sin embargo, la longitud de onda de emisión fue muy cercana al valor especificado de 405 nm, el punto focal óptimo se encontró en 9 cm, la corriente de umbral fue de 25 mA. Finalmente, al caracterizar el sistema de grabado se encontró que la velocidad ideal de grabado fue de 20 mm/seg con un espesor de la línea de 152  $\mu\text{m}$ .

## 6. Referencias

- [1] M. Gutiérrez Hernández, "Diseño, construcción y puesta a punto de un circuito de alimentación de láseres de diodo de alta potencia y amplificadores ópticos de semiconductor", Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [2] H. Zimmermann, *Integrated Silicon Optoelectronics*, 2da Ed. 2010. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. Pág. 386.
- [3] R. M. Marston, *Circuitos de Optoelectrónica*, 2da Ed. 2004, Ediciones Ceac, Barcelona, España. Pág. 280.
- [4] D. Vázquez, J. Carballido, M. De Falla, "Fundamentos del láser y su aplicación en urología" *Archivos Españoles de Urología*, Barcelona, España, vol. 61, n. 9, 2008 pág. 965-970.
- [5] L. Coldren, S. Corzine, *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits*, 2nd Ed. 2012, Wiley, New Jersey, USA, 744.
- [6] M. Dorronsoro Mendiguren, *La tecnología láser: fundamentos, aplicaciones y tendencias*. 1ra Ed. 1995. McGraw-Hill, Madrid, España. Pág. 262.

- [7] Sistema de grabado láser LS100Ex. <http://www.gravograph.com/mexico/data/l100ex.pdf>. Jun-2016.
- [8] S. López Acosta, K. Olivares Arce, M. Tavira Días. "Diseño y construcción de un sistema de grabado para PCB utilizando láser de diodo azul". Instituto Politécnico Nacional. 2013.
- [9] P. Castro Martín, D. F. Guzmán Lozada, "Diseño y construcción de una máquina CNC para el corte y grabado en madera utilizando láser de CO<sub>2</sub>, implementado con hardware y software libre como sistema de control", Universidad de las Fuerzas Armadas, 2015.
- [10] B. A. Fernández, I. A. Tobalina, R. B. Varillas, A. C. Salazar, El láser, la luz de nuestro tiempo, 1ra Ed. 2010. Globalia. Lluçmajor, España. Pág. 185.
- [11] J. L. Molpeceres Criado, "Fundamentos físicos de la tecnología láser". 2013. Grup. Español Conserv. España.
- [12] Optical Power and Energy Meter, Dual-Channel Benchtop Console. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=2748](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2748). Junio 2016.
- [13] Compact CCD Spectrometers. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=3482](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3482). Junio 2016

## **7. Autores**

Fabian Espinoza Maldonado, es alumno activo de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en el Instituto de Ingeniería y Tecnología, se encuentra próximo a obtener su grado como Ingeniero en Sistemas Digitales y Comunicaciones con orientación al Diseño de Sistemas Digitales. Ha participado en diferentes proyectos de diseño y control de maquinaria CNC, óptica y síntesis de circuitos digitales.

Abimael Jiménez Pérez, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias en Electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2008. Se desempeñó como profesor investigador en el Centro Universitario de la Costa Sur de la Universidad de Guadalajara de 2008 a 2009. De 2010 a la fecha se desempeña como profesor Investigador en el Instituto de Ingeniería y Tecnología de la

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ha participado en diferentes proyectos de investigación en el área de modelado y simulación de dispositivos semiconductores y diseño de circuitos integrados digitales y FPGAs.

J. Antonio Muñoz Gómez, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias de la computación por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en febrero del 2008. Actualmente es investigador en la Universidad de Guadalajara, Jalisco. Ha trabajado en áreas tales como computación de alto rendimiento, ecuaciones diferenciales parciales y funciones de base radial. Sus intereses incluyen el desarrollo tecnológico con fundamentos en sistemas mecatrónicos.

Ángel Saucedo Carvajal, obtuvo su grado de Doctor en Óptica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México, en 1999, desde agosto del 2012 trabaja en la síntesis de elementos ópticos difractivos para extender la profundidad focal de sistemas ópticos, ha trabajado en la caracterización y pruebas de interferometría óptica aplicada a MEMS de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Actualmente es miembro del programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP) y miembro del sistema nacional de investigadores.

José Farías Rurik Mancilla, obtuvo su grado de Doctor en Ciencias de Materiales en el Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV) campus Chihuahua en 2003. De 2009 a la fecha se desempeña como profesor de física y ciencia de los materiales en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Ha desarrollado investigación de las propiedades multiferróicas de los materiales y su acoplamiento en nanopartículas cerámicas ferroeléctricas. También está interesado en el desarrollo de sensores usando nanotecnología y la síntesis de materiales inteligentes.

# DISEÑO DIGITAL DE UN CONTROL DE POSICIÓN PARA UN MOTOR EN VHDL Y LABVIEW USANDO FPGA

***Samuel Hernández García***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna  
*Samuel\_hdez\_90@hotmail.com*

***Juan Sifuentes Mijares***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna  
*juansm@itl.laguna.edu.mx*

***Jean Philippe Andre Paistel Sanchez***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de la Laguna  
*Phil.ppe@outlook.com*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta un sistema de control proporcional, para un motor de corriente directa con un codificador rotatorio magnético integrado. Para el manejo de voltajes y corrientes del motor se utiliza el circuito integrado L293D. La etapa de control es implantada en un dispositivo de lógica programable FPGA Spartan 3s500e de la compañía Xilinx. Siendo lo más importante del trabajo: El diseño digital utilizando lenguaje de descripción de hardware VHDL junto con el diseño de la interface de comunicación y visualización de resultados y señales de referencia mediante instrumentos virtuales.

**Palabras Clave:** Control, codificador, FPGA, VHDL.

## **1. Introducción**

Diversos trabajos sobre control de motores utilizando FPGAs han sido presentados en la literatura, estos sistemas son empleados para el buen funcionamiento de sistemas más grandes como puede ser el caso de un robot manipulador o un robot tipo hexápodo [1]. También se han utilizado las FPGAs



para realizar el control de lazos múltiples para motores [2], en estudio de motores de inducción [3], aplicaciones para control de torque a motores [4][5] y otras aplicaciones de control basado en FPGAs [6]. Estos trabajos de investigación avanzada justifican el incursionar en los diseños de tipo digital con FPGAs con aplicaciones al control de motores con la finalidad de mejorar el desempeño de los sistemas superiores en los cuales estos podrían ser implementados.

Por definición un sistema de control es aquel que posee una serie de elementos que forman una configuración denominada *sistema*, de tal manera que el arreglo pueda comandar, dirigir o regular un proceso o bien a otro sistema.

De forma general, a un sistema se le aplica una señal de entrada  $r(t)$  para obtener una respuesta o señal de salida  $y(t)$ . En la figura 1 se tiene la representación general de un sistema de control, en donde se puede apreciar que la salida del sistema depende del proceso y su interacción con señal de entrada.

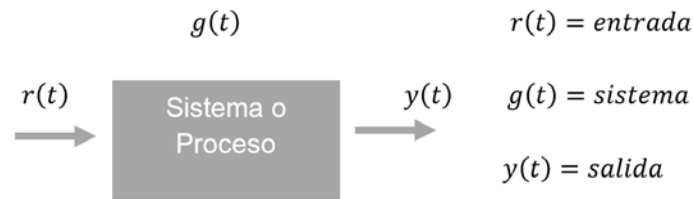


Figura 1 Diagrama a bloques de un sistema.

Los sistemas de control pueden ser clasificados en sistemas de lazo abierto; si las señales de salida no influyen en las señales de entrada, y se llama sistemas de lazo cerrado; cuando las salidas del sistema influyen en las señales de entrada. El sistema que se presenta en este trabajo es un sistema de control de lazo cerrado en el que la salida del sistema depende de una acción de control proporcional de la entrada [7].

A continuación se describen de forma general algunos términos y elementos que serán utilizados más adelante en la parte descripción del diseño:

- *Aspectos del VHDL.* El VHDL, por sus siglas en inglés, VHSIC Hardware Description Language, donde VHSIC es Very High Speed Integrated Circuit, traducido todo como lenguaje de descripción de hardware para circuitos

integrados de muy alta velocidad. Este un lenguaje orientado al diseño de hardware digital y una de sus mayores ventajas es que es un estándar IEEE usado para la creación de componentes digitales, sin la necesidad de pasar por el tedioso proceso de crear el circuito integrado pero que al final llegan a ser sintetizados dentro de un circuito integrado para realizar tareas de cualquier tipo siempre y cuando sean digitales [8][9].

- *Los dispositivos de lógica programable FPGAs.* Un FPGA - Field Programmable Gate Arrays (en español Arreglos de Compuertas Programables en el Campo), es un circuito integrado que contiene elementos digitales los cuales no están conectados en un inicio pero que es posible configurar un arreglo de conexiones de tal forma que se implemente algún dispositivo o funcione digital que se desee.

El uso de arquitecturas específicas de procesamiento implementadas sobre FPGAs presenta como principales ventajas costo-rendimiento y un ciclo de desarrollo muy corto a comparación de otras formas de desarrollo. Los bloques básicos combinacionales de ciertas FPGAs están formados por pequeñas memorias que actúan como tablas de búsqueda capaces de implementar cualquier función de un determinado número de entradas. Las herramientas de diseño suministradas por el fabricante permiten inferir el uso de memoria a partir de descripciones VHDL genéricas en la etapa de síntesis y seleccionar el tipo de memoria a utilizar en la etapa de implementación. En la última década la implementación sistemas de control sobre FPGA se ha convertido en la solución alternativa, dado que este tipo de circuitos proporcionan un mejor desempeño bajo condiciones de alta exigencia en velocidad y procesamiento en paralelo [10-14].

- *La modulación PWM.* La modulación de ancho de pulso que se abrevia como PWM, es un método de regulación de energía alimentada a una carga. Este método emplea la modificación de los tiempos de una serie de pulsos, para controlar la cantidad de energía aplicada. Algunos usos de la modulación de ancho de pulso son la regulación de corriente, voltaje y amplificación de ruido de señales eléctricas [15].

- *El codificador rotatorio.* Los codificadores rotatorios (en inglés encoder) son mecanismos utilizados para medir posición, velocidad y aceleración principalmente del rotor de un motor. Algunas de sus aplicaciones son en robótica, para enfocar los lentes fotográficos, en aplicaciones industriales y militares que requieren de algún tipo de medición angular.

Un codificador rotatorio es un dispositivo electromecánico que convierte la posición angular de un eje, directamente a un código digital. Los tipos más comunes de codificador rotatorios se clasifican en: absolutos y relativos (conocidos también como incrementales). El codificador rotatorio del motor es de cuadratura del tipo incremental, utiliza dos sensores ópticos posicionados con un desplazamiento de un cuarto de ranura el uno del otro, mediante un disco fijo al eje del motor que contiene un patrón de marcas o ranuras funciona como un interruptor óptico cuando gira generando dos señales de pulsos digitales desfasada en noventa grados o en cuadratura. A estas señales de salida, se les llama comúnmente A y B. Mediante ellas es posible registrar la información de posición, velocidad y dirección de rotación del eje. Algunos codificadores llevan una señal de referencia que se le denomina I (índice). Usualmente, si la señal A adelanta a la señal B (la señal A toma valor lógico "1" antes que la señal B, por ejemplo), se establece el convenio de que el eje está rotando en sentido horario, mientras que, si B adelanta a A, el sentido será antihorario [15].

## 2. Implementación

Para la implantación del proceso de control se crearon los siguientes componentes digitales mediante VHDL: un circuito decodificador para el codificador rotatorio, un circuito restador para la obtención del error de posición, un circuito multiplicador para la ganancia proporcional, un circuito para la obtención de absoluto para separar magnitud y signo de la señal de control, un circuito generador de PWM que proporciona la salida del circuito integrado que irá al L293. Estos componentes se interconectan de tal forma que nos permiten construir el

circuito de control para un motor DC con codificador rotatorio, el diagrama a bloques es mostrado en la figura 2.

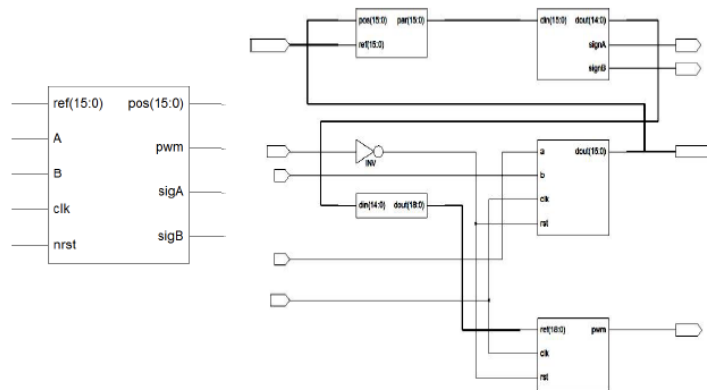


Figura 2 Control de posición de un motor DC con codificador rotatorio.

### El decodificador del codificador rotatorio

Para poder interpretar si el motor está girando en una dirección o en sentido contrario es necesario la utilización de un diagrama de estados este se observa en la figura 3, donde se muestra la estructura de la máquina de estados diseñada para el control del motor, este arreglo, nos asegura que nuestro programa realizara una serie de acciones en orden según sea el comportamiento de nuestras variables, en este caso, la señal entregada por el codificador rotatorio [15].

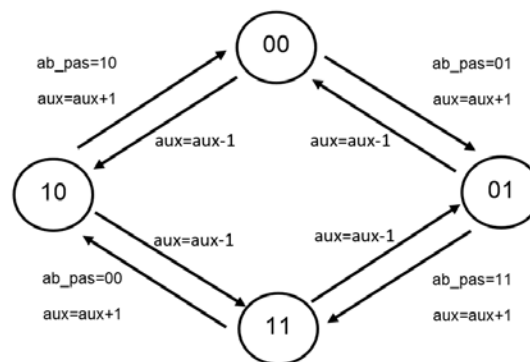


Figura 3 Diagrama de estados del decodificador de codificador rotatorio.

En la figura 4 se muestra la representación RTL, por sus siglas en inglés “register-transfer level”, el cual es un modelo de nuestro componente creado y donde se

muestran los elementos digitales internos usados así como también las entradas y salidas de este componente digital. Este componente es diseñado usando una estructura case en donde se va revisando el estado presente y el pasado para decidir si se hace un incremento o un decremento del valor de la posición actual del motor:

```

AB <= a_in&b_in;    -- AB son las señales de la salida del codificador del motor.
AB_pas <= AB;      -- Las señales son guardadas y atrasadas un ciclo de reloj.
  case AB is       -- Mediante un case se revisa el valor presente y pasado.
    when "00" =>  if AB_pas = "01" then cuenta <= cuenta + 1;
                   elsif AB_pas = "10" then cuenta <= cuenta - 1;
                   end if;
  end case;
  
```

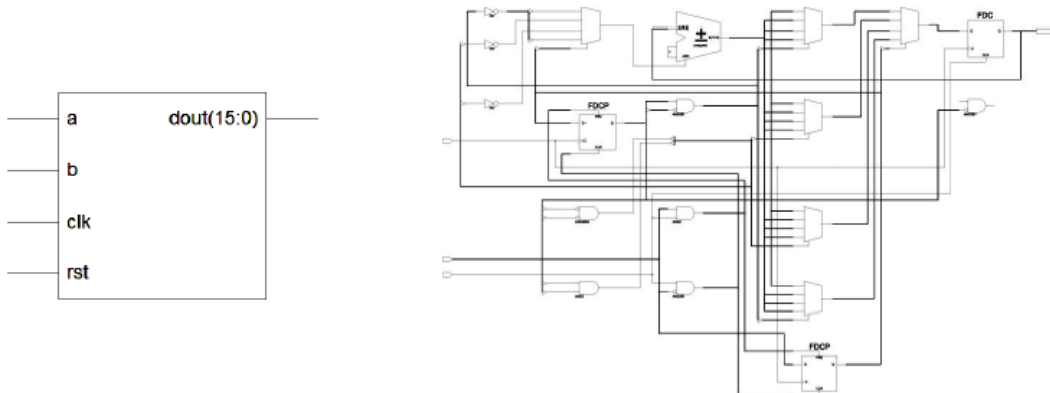


Figura 4 Representación RTL del decodificador de codificador rotatorio.

### El circuito restador

En la figura 5 se muestra el componente encargado de realizar la resta entre la posición actual con respecto a la referencia, es decir la posición deseada, y nos entregara como producto la diferencia entre estas dos señales, en otras palabras, el recorrido necesario para alcanzar la referencia. El código para realizar la resta es muy simple:

*error <= referencia – posición – La referencia de posición menos la posición actual*

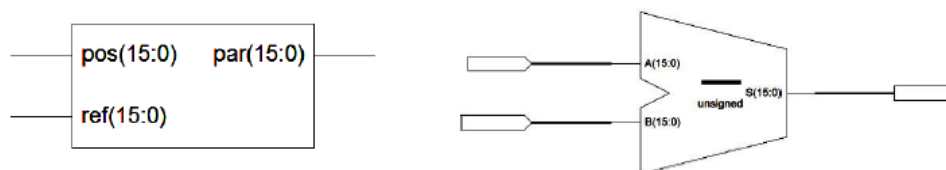


Figura 5 Circuito RTL del bloque resta.

## El circuito multiplicador

En la figura 6 se muestra el componente generado para realizar la multiplicación de una señal de entrada de 7 bits por una ganancia preestablecida de 4 bits, con lo cual logramos generar una señal de salida de 11 bits. El código es también muy simple:

```
dout <= din * ganancia
```

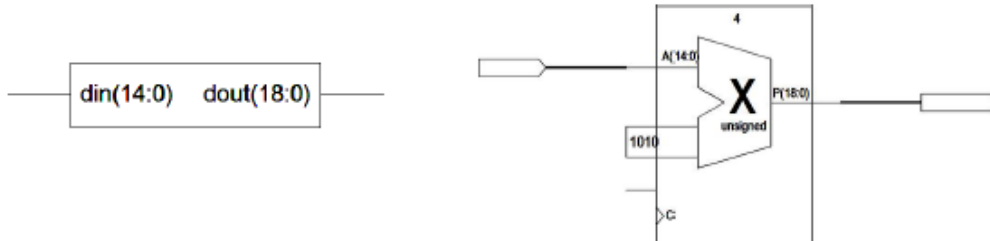


Figura 6 Circuito RTL del bloque multiplicación.

## El circuito obtención de absoluto

En la figura 7 se muestra la implementación del circuito de obtención de absoluto.

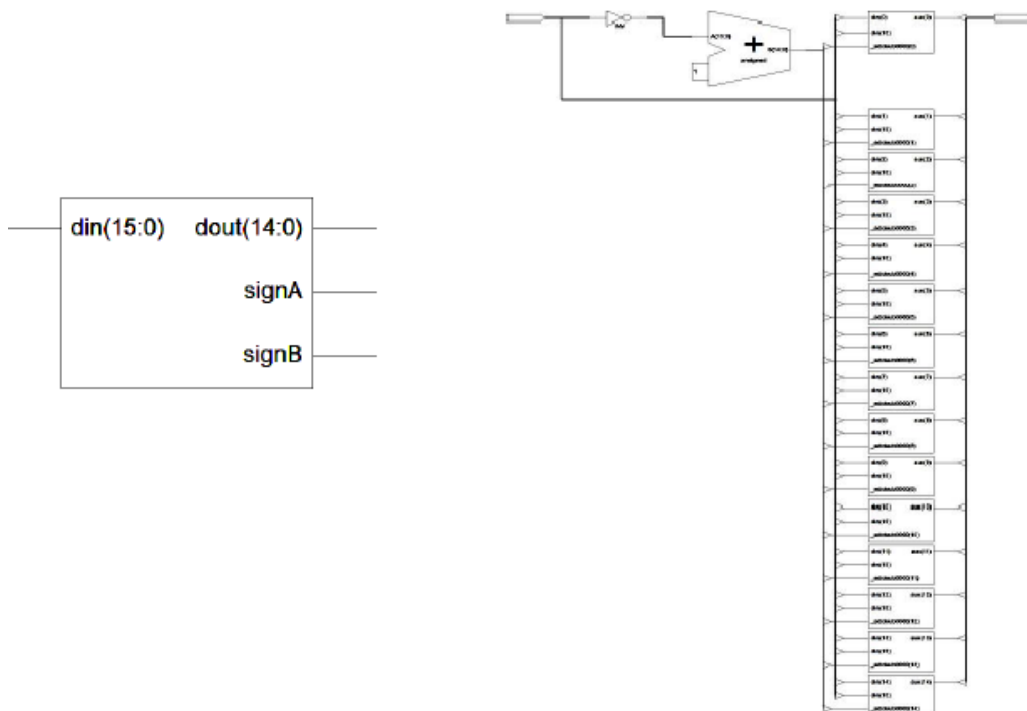


Figura 7 Circuito RTL del bloque absoluto.

El cual posee una entrada de 8 bits, a la cual le es eliminado el bit de signo para dar salida a una señal de 7 bits y las salidas que controlaran el giro del motor SignA y SignB. Este se realiza mediante operaciones de comparación revisando el bit más significativo, en caso de negatividad se realiza el complemento a 2:

*apar* <= -*par* when *par*<0 else *par*; --La señal "apar" obtiene el valor absoluto de *par*

### El generador de PWM

La figura 8 muestra el circuito RLT de nuestro componente generador del pulso PWM, este recibe un valor de referencia y por medio de un contador realiza la modulación del pulso, siendo que mientras más grande es la señal de entrada el ancho del pulso también lo es, en caso contrario, que la señal sea pequeña, la duración del pulso será menor. Este circuito es realizado mediante la comparación de una referencia contra un contador en modo de carrera libre:

*PWM* <= 0 when *ref* < *cuenta* else 1;  
*cuenta* <= *cuenta* +1;

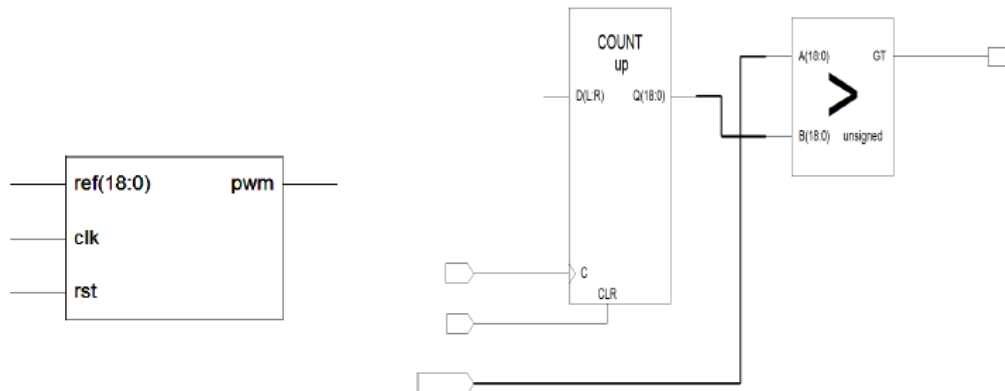


Figura 8 Circuito RTL del generador de PWM.

### 3. La implementación del ensamble completo en VHDL

El código VHDL se ha sintetizado mediante el la herramienta de Xilinx ISE 14.6, la cual funciona en un ambiente que se compone de varios programas individuales trabajando en conjunto para crear, simular e implementar diseños digitales, en este caso, para el dispositivo FPGA de una tarjeta Spartan 3s500E [16].

Para la implementación de este proyecto se definieron entradas y salidas como son mostradas en la tabla 3.1.

Tabla 1 Puertos de entrada y salidas del control PWM.

Entradas	Definición
Rst	boton de reset para el sistema
Clk	reloj de FPGA a 50 Mhz
a_in	salida del sensor hall del encoder a
b_in	salida del sensor hall del encoder b
kpin	ganancia proporcional
din	direccion de pwm de 16 bits
Salidas	
pwm	salida pwm
sign1	señal de signo para salida del motor
sign2	señal invertida de signo para salida del motor
encodercuenta	cuenta de pulsos del encoder

El motor utilizado en la realización de este proyecto cuenta con las siguientes característica; alimentación de corriente directa 12 V, cuenta con una caja de engranes con una relación de 29:1, lleva también unido al eje del motor un codificador rotatorio de cuadratura que tiene una resolución de 64 conteos por cada revolución directa en el eje del motor, y la salida en el eje de la caja de engranajes es multiplicada por la reducción siendo esta 1856 conteos por revolución y que al final usando el codificador diseñado la resolución se multiplica por 4 siendo el número de conteos en el circuito de 7424 pulsos por vuelta. El eje del motor tiene un diámetro 6mm, en la figura 9 se muestra el diagrama de conexión para los cables de motor, donde se distinguen los 6 cables, que tienen las funciones de alimentación del motor, alimentación del codificador rotatorio y señales de salida del mismo.

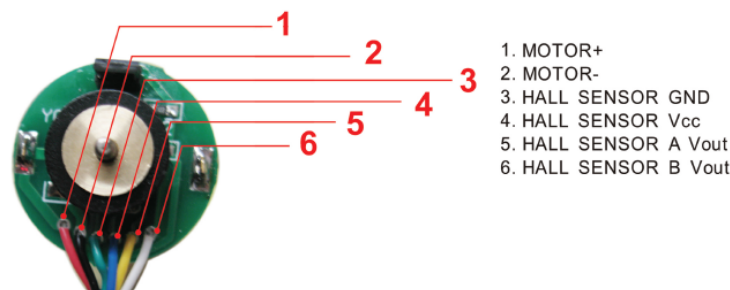


Figura 9 Diagrama de conexión de motor DC.



## La implementación en Labview

Para poder visualizar la posición de la salida del motor, verificar el funcionamiento del control, asignar la ganancia proporcional y señal de referencia al sistema de control completo se ha realizado una interfaz de instrumentación virtual con el software LABVIEW, en conjunto con el componente digital diseñado para trabajar con FPGA, en este caso la Spartan 3E.

En la figura 10 se muestra el diagrama a bloques donde se representa la comunicación entre la FPGA y la interfaz implementada en LABVIEW.

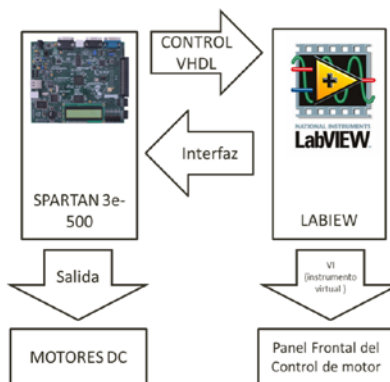


Figura 10 Diagrama a bloques relación entre la FPGA y el Panel de control virtual.

En el panel frontal de nuestro instrumento virtual el usuario puede introducir la posición deseada y modificar la ganancia  $K_p$  por medio de un control numérico, de igual forma el usuario puede visualizar el valor de torque aplicado al módulo PWM, también se tiene la posición actual mostrada en un indicador numérico. Todo esto para 5 motores a la vez y cada uno con su control de posición trabajando independiente, siendo esta una de las principales ventajas de usar FPGAs que te permite hacer copias de los circuitos sin que esto afecte el desempeño de cada uno. El número de copias solo está limitando por la cantidad de recursos del dispositivo FPGA, ver figura 11.

## 4. Resultados de implementación

Para la revisar el desempeño del motor, se generó una señal cuadrada como estímulo a la entrada por medio de un instrumento virtual integrado en LABVIEW,

el cual va asignando el valor de la posición deseada o referencia, con la finalidad de observar el comportamiento de la respuesta del control implementado.

Los datos generados son importados a Excel, figura 12, y mostrados en dos columnas, la primera nos muestra el tiempo mientras que la segunda nos muestra la posición en pulsos.

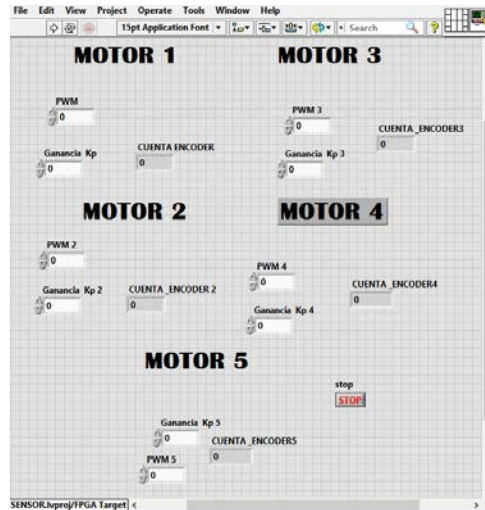


Figura 11 Panel frontal para el control de motor DC.

	señal cuadrada		kp=4		kp=55	
	tiempo	amplitud	tiempo	amplitud	tiempo	amplitud
3	0	281.25	0	0	0	0
4	0.00115	281.25	1	166	1	178
5	0.0023	281.25	2	271	2	280
6	0.00345	281.25	3	271	3	280
7	0.0046	281.25	4	271	4	280
8	0.00575	281.25	5	271	5	280
9	0.0069	281.25	6	113	6	113
10	0.00805	281.25	7	-59	7	-66
11	0.0092	281.25	8	-237	8	-246
12	0.01035	281.25	9	-267	9	-280
13	0.0115	281.25	10	-267	10	-280
14	0.01265	281.25	11	-267	11	-280
15	0.0138	281.25	12	-99	12	-103

Figura 12 Datos exportados a libro de Excel.

La figura 13 muestra la señal cuadrada en líneas punteadas, mientras que la línea azul representa la respuesta con una  $k_p=4$  y la línea roja representa la respuesta con una  $K_p$  de 55.

Se puede observar que al incrementar la ganancia la respuesta de nuestro control se acerca más a la señal de entrada, siendo el error de estado estable más pequeño.

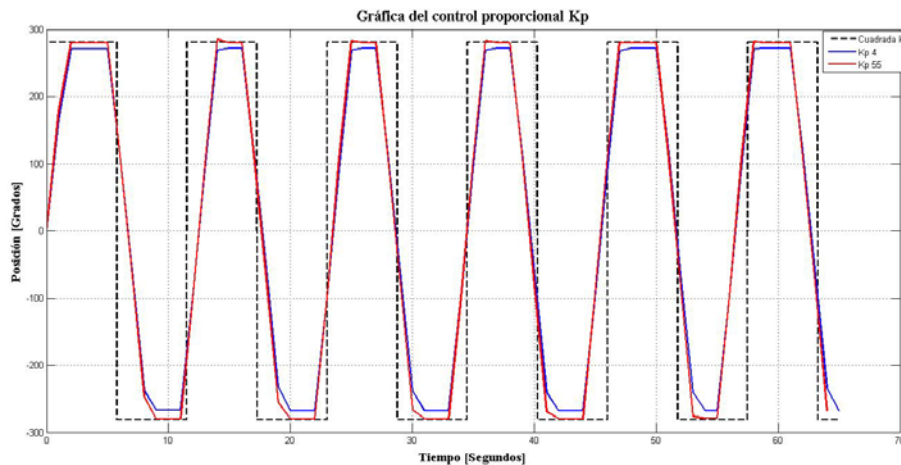


Figura 13 Gráfica de posición para el control proporcional.

## 5. Conclusiones

Se ha diseñado un circuito digital implantado en un dispositivo lógico programable FPGA Spartan 3s500e, utilizando lenguaje de descripción de hardware VHDL, para el control de posición proporcional de lazo cerrado de cinco motores de DC con codificador rotatorio, para su funcionamiento en paralelo, este funcionamiento puede ser la base para el diseño de un sistema robótico más elaborado como un robot manipulador o un robot caminante u otro diseño. También se ha creado una interfaz gráfica virtual VI en software LABVIEW, para el monitoreo de la posición del motor, el par aplicado y la asignación de la señal de referencia.

Los resultados son los esperados para un control de posición de tipo proporcional ya que este tipo de control siempre presenta un error de estado estacionario que puede ser reducido pero no eliminado al aumentar la ganancia proporcional, tal y

como se observa en la figura 2. Estos resultados son factibles de mejora al mejorar el tipo de control utilizado.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] S. Pullteap, "Development of a walking robot by using FPGA controller". 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS) /17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 2016. Pp. 054-057.
- [2] Ş. Akkaya, O. Akbatı, H. Görgün, "Multiple closed loop system control with digital PID controller using FPGA, Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)". International Conference on. 2014. Pp. 764-769.
- [3] R. Inan, M. Barut, "Speed-sensorless Direct Vector Control of Induction Motor with the EKF based stator resistance estimation on FPGA". 2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION). 2015. Pp. 343-347.
- [4] S. Krim, S. Gdaim, A. Mtibaa, M. Faouzi Mimouni, "Implementation of Direct Torque Control of an Induction Motor with high gain observer on FPGA". 2014. Pp. 284-290.
- [5] M. A. Zare, G. Rajesh Kavasseri, C. Ababei, "FPGA-based design and implementation of direct torque control for induction machines". International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig14). 2014. Pp. 1-6.
- [6] S. Boumazbar, S. Bouallégué, J. Haggége, "Co-simulation and rapid prototyping of fuzzy supervised PID controllers based on FPGA-Nexys2 board". 2015. Pp. 1-6.
- [7] K. Ogata, Ingeniería de control moderna. 2010. PEARSON. Madrid.
- [8] Brown, Vranesic, Fundamentos de lógica digital con VHDL. 2006. Mc-Graw Hill.

- [9] J. Kim, J. S. Jung, Hardware implementation of nonlinear PID controller with FPGA based on floating point operation for 6-DOF manipulator robot arm, *Automation and Systems*. 2007.
- [10] M. Ciletti, *Advanced Digital Design using Verilog HDL*. 2004.
- [11] M. Alcalá, *VHDL el arte de programar sistemas digitales*. 2006. CECOSA.
- [12] Pong P. Chu, Wiley, *FPGA prototyping by VHDL examples*. 2008.
- [13] E.D. Baran, *LabVIEW FPGA. Reconfigurable measuring and control systems*. 2015. Russian Edition.
- [14] R. Bitter, T. Mohiuddin, M. Nawrocki, *LabView: Advanced Programming Techniques*. Second Edition. 2007. CRC press.
- [15] E. del Castillo, "Control de procesos: Implementación de una plataforma hardware/software para la experimentación en control digital directo: controladores PID y Fuzzy". *PUBLICACIONES UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI*. 2008.
- [16] *Spartan-3E Starter Kit Board User Guide*. Xilinx. 2006.

## **7. Autores**

El Ing. Samuel Hernández García actualmente se encuentra estudiando la Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón Coahuila.

El Dr. Juan Sifuentes Mijares, es doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica y profesor del Departamento de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna.

El Ing. Jean Philippe Andre Paistel Sanchez es egresado del Tecnológico Superior de Lerdo y actualmente está cursando una maestría en ciencias en ingeniería eléctrica con especialidad en control automático en el Instituto Tecnológico de la Laguna en Torreón Coahuila.

# **CERTIFICACIÓN EN DB2 DE LAS COMPETENCIAS EN BASE DE DATOS DE LOS ESTUDIANTES DE LA LICENCIATURA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**

***Luis Antonio Álvarez Oval***

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Contaduría Pública  
*loval@unach.mx*

***Christian M. Castillo Estrada***

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Contaduría Pública  
*cmce@unach.mx*

***Aron de la Cruz Vázquez***

Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Contaduría Pública  
*aron.cruz@unach.mx*

## **Resumen**

Este artículo describe el proceso que conduce a los estudiantes del estudio académico hasta obtener una certificación industrial en la base de datos denominada DB2 por medio del programa Iniciativa Académica de IBM. Las Bases de datos actualmente juegan un papel importante, tanto a nivel personal como empresarial, son necesarias para cualquier organización, para que sea efectiva en la empresa, no solo basta con tener datos guardados, hay que conocer la manera adecuada de gestionarlos para obtener información que permita tener un control eficiente de las operaciones diarias, otro necesidad que solucionan estas herramientas es la de compartir los datos entre los diferentes integrantes de la organización. Así mismo se explica el motivo para elegir uno de los dos programas que se evaluaron, la instalación del software necesario en los laboratorios de cómputo, los cursos y lecturas necesarios para enfrentar el examen de certificación, exámenes de prueba y finalmente el desarrollo del examen de

certificación mismo. También se hace una descripción de dos programas que ofrecen certificaciones industriales en México, uno público y otro privado. Se termina explicando los resultados que se obtuvieron del proceso.

**Palabras clave.** Certificación de la industria, educación basada en la industria, mercado de trabajo en Tecnologías de Información y Comunicación.

## 1. Introducción

Este artículo describe el proceso para certificar las competencias en el área de base de datos de los estudiantes de la Licenciatura en Sistemas Computacionales (LSC) que se imparte en la Facultad de Contaduría Pública (FCP) del campus IV de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH). El campus IV se ubica geográficamente en la costa de Chiapas cerca de la frontera con Guatemala, en la ciudad más importante de la región: Tapachula. Para certificar estas habilidades nos apoyamos en el programa Iniciativa Académica que ofrece la empresa IBM.

El programa de LSC inició en 1999, desde el principio fue necesario establecer relaciones con las empresas, desarrollar proyectos aplicados del entorno, gestionar los laboratorios de cómputo, capacitar a los docentes y motivar a los alumnos, con la finalidad de crear un programa de alta calidad. La acreditación del programa de LSC fue otorgada por el Consejo Nacional de Acreditación en informática y Computación (CONAIC) en abril del 2012.

En el año 2005, con motivo del Segundo Ciclo de Conferencias de Software Libre organizado en la FCP de la UNACH, nos acompañó el Dr. Alfredo Pérez Dávila, Director del programa de Ciencias de la Computación de la Universidad de Houston - Clear Lake. El Dr. Pérez Dávila se ofreció para establecer contacto con la empresa IBM en Estados Unidos de América con la finalidad de conseguir acceso al programa académico de IBM para la FCP, la oficina estadounidense delegó a IBM de México la responsabilidad de otorgar el acceso al programa, el cual nos fue otorgado ese mismo año.

El Programa para el Desarrollo de la Industria de Software (PROSOFT) fue implementado en Octubre de 2002 por el gobierno mexicano, ha evolucionado hasta la forma actual: el PROSOFT 3.0, cuyo objetivo es el de promover el

desarrollo y la adopción de las tecnologías de la información y la innovación en los sectores estratégicos del país que contribuya a incrementar su productividad. Con la intención de hacer frente a los retos que actualmente presenta el sector de TI, PROSOFT ha establecido 5 estrategias:

- Formación de capital humano especializado en tecnologías de la información y en innovación en los sectores estratégicos.
- Generación de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación en los sectores estratégicos.
- Financiamiento para las empresas de los sectores estratégicos para el desarrollo y adopción de tecnologías de la información e innovación.
- Generación de infraestructura para el desarrollo y adopción de las tecnologías de la información y la innovación.
- Generación y difusión de conocimiento en materia de TI e innovación a través de estudios y eventos [2].

Mexico-FIRST es una iniciativa coordinada por la Cámara Nacional de la Industria Electrónica, de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (CANIETI) y respaldada tanto por Secretaría de Economía, como por el Banco Mundial. Donde el objetivo principal de estos programas es que los recursos humanos certifiquen sus habilidades para fortalecer la oferta laboral tanto en cantidad como en calidad [9].

La revista especializada Software Gurú, ha desarrollado una serie de encuestas salariales anuales del mercado laboral de las tecnologías de información y comunicación (TIC). Las que han sido financiadas en el pasado por PROSOFT y que muestran la evolución del mercado laboral mexicano. En particular, se destaca la encuesta salarial del año 2013 ya que nos muestra la distancia entre los sueldos alcanzados por los profesionales certificados y aquellos que no lo están. Incluso presentan una lista de sueldos por herramienta en la que los profesionales adquieren una certificación.

Finalmente, la ubicación geográfica de Tapachula y el sector social que atiende la UNACH aportan dos problemas difíciles de superar, la distancia de los centros de



certificación y los costos asociados al examen. Los centros de certificación más cercanos se encuentran en Coatzacoalcos, Veracruz y la Ciudad de México, estos dos lugares se encuentran a 10 y 17 horas de distancia en un viaje por tierra desde nuestra ciudad. Esto hace necesario que para obtener una certificación el estudiante debe tomar en cuenta los siguientes gastos: precio del examen, costo del viaje, hospedaje y alimentación. Si se combina con la dificultad de nuestros estudiantes para acceder a recursos económicos, el costo generado para conseguir una certificación se vuelve inalcanzable.

## **2. Estado del Arte**

Existen en el país varias ofertas para que los estudiantes obtengan certificaciones industriales, unas promovidas por el gobierno federal y otras ofrecidas por empresas del sector tecnológico. Cada una tiene ventajas y desventajas, pero fueron las condiciones económicas del sector que se atiende en la FCP la que nos ha llevado a elegir una de las opciones disponibles. Se evaluaron dos programas que facilitaban el acceso a las certificaciones para nuestros alumnos, por su pertinencia y accesibilidad. México First paga cualquier certificación, implementar todos los procesos de cada organización sería imposible.

### **Salarios del mercado mexicano de TIC**

La revista Software Gurú estudia la evolución del mercado laboral mexicano en TIC, desde el 2010 [5], aunque no garantiza una muestra representativa ya que son encuestas abiertas, la información contenida en estos artículos permite encontrar tendencias del mercado mexicano de TIC. Sutliff [14] desafía: "... los académicos deben enfrentar el desafío de imaginar el mundo que les rodea. Deben darse cuenta de que... sus alumnos (y los padres de familia y los contribuyentes que ayudan a pagar los salarios de los profesores) esperan un retorno de su inversión".

Por lo que ante la perspectiva de que los egresados van a incorporarse al mercado de trabajo en el área de las TIC, se debe buscar que tengan las mejores

habilidades para obtener el mejor sueldo posible. Software Gurú en su reporte de salarios del 2013 [4], que corresponde a salarios en base a la actividad, muestra que el sueldo promedio que percibe un administrador de datos es de \$18,480. Mientras que el sueldo que corresponde a un administrador de datos certificado en la base de datos Oracle es de \$32,725. DB2 es una base de datos equiparable a Oracle por lo que este sueldo se toma como referencia para comparar las remuneraciones. Al observar estas tablas podemos apreciar que la diferencia en sueldos entre un empleado certificado contra uno que no lo está, es considerable. De ahí surge la necesidad de complementar la educación que se ofrece en la universidad con el conocimiento que requieren los empleadores y la industria de las TIC.

### **Programas que apoyan la certificación industrial**

Se evaluaron dos programas, que ofrecen certificaciones de la industria, para lograr la certificación de las habilidades de los estudiantes: Mexico First y la Iniciativa Académica de IBM. La elección que se hizo fue determinada por el costo que implica obtener la certificación, por lo que nuestra elección fue tomar el camino que nos ofrece IBM.

#### **Programa Mexico First**

Es una iniciativa coordinada por la Cámara Nacional de la Industria Electrónica de Telecomunicaciones e Informática (CANIETI) y respaldada tanto por la Secretaría de Economía como por el Banco Mundial, la cual tiene como objetivo principal la generación de capital humano con el fin de fortalecer la oferta laboral en cantidad y calidad. Esta iniciativa ofrece, a los interesados en obtener una certificación industrial, una beca para tomar un curso o el examen pertinente para la tecnología elegida [9]. En la sección del catálogo de certificaciones [16] que ofrece este programa, se puede encontrar las siguientes opciones de certificación para bases de datos: SQL Server, MongoDB, PostgreSQL, y Oracle Database. Las certificaciones de SQL Server exigen que 700 puntos mínimos para obtener la certificación. El porcentaje real de preguntas que debe responderse correctamente

varía en cada examen y puede ser superior o inferior al 70 % [17]. Microsoft no ofrece el precio de la certificación en la página consultada. La base de datos MongoDB no ofrece información de la puntuación mínima para obtener la certificación como DBA [18]. El precio del examen es de \$150 USD. PostgreSQL ha concesionado a la empresa EnterpriseDB la venta de cursos y certificaciones para esta base de datos, se requiere de una calificación mínima del 70% para el nivel asociado y una de 80% para el nivel profesional [19]. El costo del examen de certificación es de \$200 USD. Las políticas de Oracle con respecto a la certificación en su herramienta de base de datos, requiere que primero se validen los conocimientos del lenguaje de SQL, la calificación mínima para obtener la certificación en este nivel es de 63% [20]. El precio del examen es de \$2,787 USD. Ninguna de las páginas consultadas explica el idioma en el que se puede tomar el examen de certificación, sin embargo, solo la página de Microsoft ofrece información del proceso de certificación en idioma Español, el resto solo lo ofrece en idioma Inglés. Por lo que se infiere que el examen está disponible en idioma Inglés.

En la 6ª convocatoria que se cerró en Marzo del 2015 [10], se ofrecieron becas para acceder a certificaciones de clase mundial para 700 estudiantes. El estudiante que es elegido por este programa debe pagar el examen de certificación al 100% y solo en caso de aprobarlo se devuelve el importe. Este programa no incluye becas de transporte, alojamiento y alimentos para aquellos estudiantes que viven lejos de los centros de capacitación y certificación.

### **Programa Iniciativa Académica (PIA) de IBM**

IBM es una empresa multinacional de tecnología y consultoría, fabrica y comercializa hardware y software para computadoras. Actualmente ocupa la posición 23 de la lista Fortune 500. El PIA de IBM es un programa cuyo objetivo es “ayudar a los educadores en todo el mundo a enseñar a los estudiantes habilidades requeridas por el mercado” los beneficios de este programa son: A) Acceso sin cargo o con descuentos a software de IBM, cursos, hardware y recursos tecnológicos para miembros y B) Oportunidades de desarrollo de

habilidades que van desde eventos de IBM y de los ecosistemas hasta concursos estudiantiles [6]. La sección denominada “Teaching Topics” [7] ofrece un panorama de las herramientas que IBM otorga como parte de esta iniciativa.

Aunque las certificaciones que este programa ofrece están circunscritas a herramientas desarrolladas y vendidas por IBM, tiene aspectos muy interesantes para ser aplicada en la institución. Ofrece dos certificaciones: una académica sin costo y una profesional con un costo muy bajo (30 USD). Para obtener la certificación IBM exige una calificación mínima de 60%. El examen de certificación como tal es tomado por los candidatos en las instalaciones de la FCP y supervisado por personal de IBM. Este programa no tiene costos asociados para alimentación, alojamiento y traslados de los estudiantes.

### Comparación de los programas

Para comparar los programas, hemos elegido distintas certificaciones de bases de datos y dos variables económicas, las cuales impactan en el costo de obtener la certificación y una académica, la que también ha impactado en otros procesos de certificación previos. Estas variables son: 1. Precio del examen. 2. Requiere de traslado del estudiante a un centro de certificación y 3. Examen requiere de manejo del idioma Inglés.

De la comparación de los dos programas se obtienen los resultados expuestos en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1 Precio del examen.

Programa México-First	Precio USD	Programa PIA de IBM	Precio USD
MongoDB	150	DB2	Gratis o 30
Sql Server	No disponible		
PostgreSQL	200		
Oracle 12	2,787		

Tabla 2 Requiere de traslado del estudiante a un centro de certificación.

Programa México-First	Viaje	Programa PIA de IBM	Viaje
MongoDB	NO	DB2	NO
Sql Server	SI		
PostgreSQL	NO		
Oracle 12	SI		

Tabla 3 Examen requiere de manejo del idioma Inglés.

Programa México-First	Inglés	Programa PIA de IBM	Inglés
MongoDB	Se infiere que si	DB2	Si
Sql Server	No disponible		
PostgreSQL	Se infiere que si		
Oracle 12	Se infiere que si		

### **Integración de la certificación con el grado académico**

En esta facultad, muchas discusiones han sucedido al interior del claustro de docentes para incorporar a los estudiantes a los procesos de certificación de la industria, La academia de Ingeniería de Software, ha favorecido el trabajo de capacitación en el proceso de Certificación de DB2. El primer reto que fue enfrentar al examen de programador certificado Java. En el que 23 candidatos se presentaron al examen de certificación, de los cuales solo 7 aprobaron el mismo. Al evaluar los conocimientos de todos los candidatos se encontró que tenían una buena interpretación del lenguaje de programación. Simmonds [13] argumenta que “es importante para las universidades que sus graduados menos exitosos tengan las habilidades esperadas por la sociedad”. Y el simple hecho de que no todos los candidatos hayan alcanzado la certificación en ese momento, no significa que no podrán hacerlo en el futuro.

La experiencia que comparten los egresados de LSC muestra que en el entorno laboral no solo es útil el conocimiento teórico que se ofrece en las aulas, sino que es necesario saber aplicar las teorías en las herramientas específicas que se usan para desarrollar sistemas de información. A través de los mecanismos implementados para el seguimiento de egresados, estos han solicitado que enseñemos el uso de herramientas, lenguajes y frameworks específicos. Estos requerimientos coinciden con Montante y Khan [11] quienes afirman que “la certificación establece un estándar de competencias en áreas y roles de trabajo específicos”. Mientras que Cosgrove [3] anota que mientras las instituciones académicas dan a los estudiantes de IT una base académica bien redondeada que les permite moverse a la industria, la certificación de la industria agrega competencias para usar productos específicos.

Para un buen desarrollador de sistemas de información, es importante la aplicación práctica de las teorías que se aprenden durante la formación profesional. Por lo que es imprescindible que los jóvenes tengan la experiencia necesaria para enfrentar esta etapa, donde las teorías se concretan en herramientas. Poteat [12] coincide, al decir que "el objetivo primordial de cualquier institución de educación superior consiste en proporcionar a los graduados las herramientas adecuadas para que sean competitivos, independientemente de dónde van después de la graduación".

En la UNACH, los estudiantes que se enfrentan al examen de certificación en DB2 son aquellos que han cursado y aprobado las materias: Diseño de Base de Datos, Lenguajes de Consulta, Administración de Base de Datos y la materia optativa de Especialización en DB2, las que se imparten en tercer, cuarto, quinto y octavo semestres de la licenciatura respectivamente. Las materias no optativas son impartidas usando la base de datos denominada PostgreSQL, por lo que han adquirido suficiente experiencia para tomar la capacitación específica de DB2. El contenido de las materias básicas antes mencionadas de la LSC en la UNACH son congruentes con los modelos curriculares de nivel superior de Informática y Computación de la Asociación Nacional de Instituciones de Educación en Tecnologías de Información (ANIEI) publicados en Junio de 2014 [21] y están basadas en el modelo Relacional de base de datos. La materia optativa del plan de estudios de LSC que se ha adaptado para agregar competencias en el uso de DB2 incluye: repaso del Modelo Relacional de base de datos, funcionamiento del DB2 (servidores e instancias), bases de datos y objetos de datos en DB2, seguridad en DB2, bases de datos semi-estructuradas, tipos de datos XML (se incluyen tópicos de Estructuras de Datos para árboles generales), Lenguajes: XQuery, Xpath, y la asociación con SQL, modelo de concurrencia y niveles de aislamiento en DB2. El curso optativo completo se ofrece con diapositivas y laboratorios del curso oficial de IBM, los cuales se encuentran en idioma Inglés, aunque se les explica la clase en idioma Español.

Además, los estudiantes que se enfrentan al examen de certificación han cursado seis semestres del idioma Inglés, los cuales son obligatorios y forman parte del

plan de estudios de LSC, y se encuentran ubicados de segundo a séptimo semestre del currículo. Y es optativo cubrir los niveles 7, 8 y 9 del nivel básico. Esta restricción de obligatoriedad también es congruente con los requerimientos de acreditación del CONAIC. Los planes de estudios están diseñados teniendo en cuenta el nivel A1 del marco de referencia europeo, cada curso tiene objetivos: Nacionales-Funcionales, Comprensión Auditiva, Expresión Oral, Comprensión Escrita y Expresión Escrita.

Las referencias ofrecidas previamente han sido útiles para convencer a los docentes de la facultad para incorporar las certificaciones industriales al proceso académico; y si a esto se le suman las políticas públicas que ha implementado el gobierno mexicano en torno a la certificación industrial se abre la oportunidad para que los egresados accedan a empleos bien remunerados. Aunque se debe reconocer que una buena parte del apoyo logrado proviene de los docentes del perfil de Ciencias de la Computación menores de 30 años, ya que en su mayoría han logrado certificarse en áreas diversas tales como: Java, robotC, DB2 y Visual Basic.

Como se puede apreciar, la certificación en la base de datos DB2 es la más económica, lo que la hace accesible a nuestros estudiantes. Los conocimientos teóricos, trabajo y esfuerzo para obtenerlas son los mismos, que las certificaciones ofrecidas por otras empresas. Por lo que se ha tomado la decisión de optar por la certificación en DB2, el apoyo de IBM ha sido fundamental para lograr que los estudiantes busquen certificarse a bajo costo.

### **3. Metodología de implementación**

Antes de iniciar el proceso de capacitación es indispensable incorporar la institución al PIA de IBM, es necesario que cada institución académica firme un convenio de colaboración con la empresa, ya que sin este no es posible el registro del docente al programa. Ya con el acuerdo firmado, cada docente interesado en participar debe de registrarse en la página oficial del PIA, donde se le requiere que envíe un contrato personal, una vez que su registro ha sido aceptado se obtiene el acceso a los recursos del programa.

A continuación se explica de manera detallada los compromisos, cursos, páginas e información necesarios para preparar a los estudiantes para enfrentar el examen de certificación:

- **Preparación del laboratorio de cómputo.** El laboratorio debe de prepararse para la instalación de la base de datos en modo virtual, IBM proporciona los archivos necesarios que se descargan del sitio oficial [8]. El archivo descargado contiene una imagen de la base de datos que funciona en modo virtual sobre Linux.

Por lo que antes de poder usar la base de datos, es necesario instalar la aplicación de virtualización vmWare. Y sobre esta aplicación se ejecuta la base de datos que se va a usar a lo largo del curso. Es importante verificar los requerimientos de hardware de la aplicación en la página oficial de esta. Se debe instalar vmWare en cada uno de los equipos ya que los ejercicios se desarrollan localmente.

- **El docente y los estudiantes candidatos.** El proceso de capacitación para certificación requiere de un docente, quien debe estudiar la herramienta elegida y después explicar a los estudiantes los conceptos que se practican en el curso. Aunque el docente apoya al estudiante en el proceso de capacitación es necesario comentar a los candidatos que el examen exige, por su naturaleza, que el alumno estudie y comprenda los conceptos que se van a evaluar.
- **Curso introductorio.** El archivo descargado contiene diapositivas y laboratorios. Las diapositivas explican los conceptos teóricos, y los laboratorios contienen los ejercicios que se deben desarrollar, ya que son los que dan experiencia para enfrentar los exámenes de certificación. Este proceso toma casi un mes, ya que prácticamente se desconocía la base de datos. El examen evalúa el conocimiento de la herramienta, no temas genéricos de bases de datos.
- **Cursos adicionales para los temas asociados a XML.** Un tema importante de esta certificación es la sección dedicada al desarrollo de consultas sobre datos almacenados en XML, al que se le denomina



pureXML. Algunos alumnos desconocían los conceptos de XPATH y XQUERY, por ello fue necesario hacer un repaso de estas tecnologías. Se encontró que los cursos sobre estos temas que ofrece la página w3schools en línea [15], están bastante resumidos. Aunque los cursos son independientes de la plataforma, IBM se apega a la sintaxis de los lenguajes, por ello fue de bastante utilidad esta información.

- **Cursos en línea.** IBM ha creado un sitio para capacitación en línea al que han denominado “BigData University”, éste funciona de forma parecida a los portales de capacitación en línea como: Udacity, Acamica o Coursera. Para acceder a esta información no necesita ser parte del PIA, pero si es necesario registrarse. Estos cursos son importantes sobre todo en temas como pureXML y los conceptos básicos del DB2, por lo que el docente puede apoyarse en los videos que se ofrecen.
- **Lectura adicional.** Con la experiencia obtenida en exámenes de certificación previos, se sabe que las preguntas que contienen no sólo evalúan los conceptos fundamentales, sino que evalúan usos inesperados o poco conocidos de los comandos de la herramienta. La única manera para adquirir estas habilidades que el evaluador espera que el candidato domine es por medio de la lectura de libros de certificación que se encuentran en el mercado. Para esta evaluación se usó el libro "DB2 9 Fundamentals: Certification Study Guide" de Roger Sanders, ya que el examen fue para esta versión. Aunque existen otros textos, en múltiples foros de Internet se sugiere este libro y se puede dejar que los jóvenes lo estudien por cuenta propia.
- **Exámenes de prueba.** El proceso de capacitación concluye con la aplicación del examen de prueba, en esta parte los alumnos sienten la presión del tiempo, ya que solo se tienen 1.5 minutos para contestar cada pregunta. En [1] se encuentra la liga que contiene este examen de prueba y corresponde al sitio de Big Data University. Aunque es un examen para una versión anterior, el alumno experimenta la presión del tiempo y lo familiariza con la forma en que lo van a evaluar. En este examen de prueba los

alumnos deben intentar una y otra vez hasta obtener una calificación aprobatoria.

- **Examen de certificación.** Una vez concluida la preparación de los estudiantes, llega el momento de certificarse. Muchas circunstancias se presentan para alcanzar la certificación, como lo es, estar nervioso, tener cansancio, estar desconcentrado por mencionar algunas. Lo que puede originar que no todos aprueben el examen, ya que muchas preguntas son capciosas, otras exigen conocimientos profundos de los procesos internos de la aplicación, y porque no decirlo algunas son realmente confusas. Las expectativas con respecto a los resultados suelen ser muy altas pero no siempre se logran los objetivos esperados, por lo que después del examen es necesaria una plática motivacional con aquellos que no aprobaron.

#### **4. Resultados Experimentales**

Iniciaron el proceso de capacitación para certificarse 20 candidatos, conforme se avanzó, algunos desertaron. Al examen de certificación se presentaron 14 candidatos y el docente a cargo del proyecto, el cual tuvo efecto en el Laboratorio Linux A de la FCP, el 9 de Septiembre del 2015. Un alumno y el docente alcanzaron la certificación, dos quedaron a menos de 4 preguntas para alcanzarla y el resto de los candidatos estuvieron lejos de la calificación necesaria para certificarse.

Cuestionando a aquellos candidatos que no aprobaron el examen de certificación, 6 mencionaron que el principal problema fue elegir el idioma del examen, ya que optaron por resolverlo en español. Ya que el sistema ofrecía la traducción de las preguntas, pero también la de los comandos de SQL, lo cual añadió mayor confusión. Mientras que los 9 restantes eligieron presentarlo en idioma Inglés. Los 14 sustentantes coincidieron en señalar que es necesario mejorar los 6 cursos obligatorios del idioma Inglés, ya que no usan documentación técnica para ayudar al objetivo de la comprensión escrita de dicho idioma. 5 candidatos dijeron que necesitaban estudiar con mayor profundidad el libro de la guía de certificación. También los 14 sustentantes coincidieron en señalar que poseen los

conocimientos técnicos suficientes para usar la herramienta, que el curso específico de DB2 ha terminado de redondear sus conocimientos teóricos y prácticos de bases de datos, y que son capaces de construir la solución a cualquier problema que se les presente en la vida profesional. Los 14 sustentantes instalaron la base de datos en sus equipos personales, con la finalidad de seguir practicando después de finalizado el curso, expresando que esta acción les ayudó a superar, después de varios intentos, los exámenes de prueba en la sección de consultas con SQL, XPath y XQuery. Todos coincidieron en señalar que a medida que se acercaba el final del semestre la exigencia académica iba en aumento, en detrimento del tiempo que dedicaban a estudiar la documentación de la certificación. Finalmente, tres mencionaron que los nervios les impidieron contestar correctamente el examen. Pero todos coincidieron en estar dispuestos a presentar nuevamente el examen de certificación.

Lo que se puede deducir de la respuesta de los alumnos es lo siguiente:

- Aunque se logre un dominio aceptable en el uso de la herramienta, y se tengan conocimientos teóricos bien fundamentados, es posible no alcanzar la certificación debido a la falta de dominio del idioma en el que se presenta el examen: inglés.
- Los exámenes de certificación deben efectuarse en los periodos inter-semestrales, para que el sustentante no tenga presiones de trabajos académicos que lo distraigan del objetivo de certificarse.
- Mejorar los cursos del idioma inglés, acentuar el objetivo de comprensión lectora como el más importante en el plan de estudios, con la finalidad de que nuestros estudiantes tengan una mayor oportunidad al enfrentar un examen de certificación.
- Solicitar al departamento psicopedagógico de la facultad un curso de manejo del estrés para todos los postulantes previo al examen de certificación y una motivacional posterior al mismo para todos aquellos que no tengan un resultado aprobatorio.
- Solicitar a la Academia de Ingeniería de Software y Tratamiento de Información que los docentes de las materias obligatorias del plan de

estudios asociadas a base de datos, usen DB2 como herramienta de trabajo básica, para que el estudiante aplique los conocimientos teóricos y sea este el inicio de la preparación para enfrentar el examen de certificación.

- Finalmente solicitar a la misma academia la actualización del plan de estudios, para incluir los temas de XML, XPath, xQuery y conversión de documentos XML a árboles generales.

## **5. Conclusiones y Trabajo Futuro**

El trabajo desarrollado produjo un impacto significativo en los estudiantes que aún no han tenido la oportunidad de enfrentar un examen de certificación. Actualmente, muchos estudiantes están interesados en acceder a esta oportunidad y se busca que aquellos que no aprobaron en el primer intento, tengan una segunda opción para junio del 2016. En cuanto los estudiantes egresen de la LSC y se integren al mercado laboral, se efectuarán estudios para medir el resultado de la incorporación de estos programas de certificación al programa académico.

Es necesario mejorar el dominio del idioma Inglés, por lo que se debe establecer un programa de traducción de artículos científicos (del Inglés al Español) para todos los estudiantes de LSC, por lo que es necesario el compromiso de los docentes del perfil para que desde primero hasta noveno semestre del programa de licenciatura se implemente el programa. Este requerimiento también se ha comentado con el director de la Escuela de Lenguas, para que en el periodo agosto-diciembre del 2016 los docentes que imparten el idioma Inglés inicien con la lectura de textos científicos de Ciencias de la Computación con el fin de mejorar la comprensión escrita.

Se están desarrollando reuniones para promocionar entre los docentes de LSC el PIA de IBM, con el objetivo de lograr el compromiso de ofrecer oportunidades de certificación en otras herramientas que IBM nos ofrece a través del programa. Se espera que en el plazo de un año se estén ofreciendo oportunidades de certificación en distintas aplicaciones a nuestros estudiantes. En este momento

IBM nos ha facilitado 700 cuentas para acceder a equipos de la Power Systems Academic Cloud. Estos equipos cuentan con sistema operativo IBM i y AIX, además se encuentran instaladas herramientas como DB2, WebSphere, lenguaje C, RPG, Cobol, etc. Se cuenta con acceso a cursos en línea, y existe un programa de certificación para cada sistema operativo, en diversas áreas tales como: Grandes conjuntos de datos, administración de sistemas, programación Shell, bases de datos, lenguajes de programación, etc. La existencia del programa PIA de IBM, permite que nuestros estudiantes tengan a su alcance herramientas e infraestructura que están fuera del alcance del presupuesto de la FCP y que nuestros estudiantes certifiquen sus conocimientos a bajo costo. También estamos esperando los cambios que IBM está haciendo en sus programas de certificación, nos han informado, que el nuevo modelo estará basado fuertemente en los cursos que ofrecen en la página [BigDataUniversity.com](http://BigDataUniversity.com).

Finalmente, se desarrollarán diplomados y seminarios de titulación orientados a ofrecer certificaciones de los programas PIA de IBM y MexicoFirst de la Secretaría de Economía, los cuales serán ofrecidos no solo a los estudiantes de la FCP, sino que lo serán al público en general.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] Big Data University. Sitio oficial (s.f.). <http://bigdatauniversity.com/courses/course/view.php?id=272>. Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [2] Secretaría de Economía. Acerca de Prosoft 3.0 (s.f.). <https://prosoft.economia.gob.mx/acercade/>. Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [3] S. Cosgrove, "Academic Qualification & Industry Certification: Integrating Education with Practice". Artículo presentado en la 17th NACCQ, 6th - 9th July 2004, Christchurch, New Zealand.
- [4] Estudio de salarios SG 2013". Revista Software Gurú. Núm. 42. Noviembre 2013. Pp. 22-25.
- [5] "Encuesta de salarios 2010: Salarios y Factores". revista Software Gurú. Núm. 30. Diciembre 2010. Pp. 28-32.

- [6] IBM, IBM Academic Initiative (s.f.). <https://developer.ibm.com/academic/membership/>. Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [7] IBM, Iniciativa Académica IBM. Sitio oficial (s.f.). <https://developer.ibm.com/academic/resources/category/topic-overview/>. Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [8] IBM. Software DB2. Sitio oficial (s.f.). [https://www14.software.ibm.com/webapp/iwm/web/pick.do?source=swg-db2acadtraindvd&S\\_TACT=100KG25W&lang=en\\_US](https://www14.software.ibm.com/webapp/iwm/web/pick.do?source=swg-db2acadtraindvd&S_TACT=100KG25W&lang=en_US). Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [9] MexicoFirst. Sitio oficial (s.f.). <http://www.mexico-first.org>. Recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [10] MexicoFirst. 6ª. Convocatoria Nacional MexicoFirst. [http://www.mexico-first.org/templates/mexico\\_first/4aconv/Formato%20Aviso%20Expresi%C3%B3n%20inter%20A9s%20%283%29..pdf](http://www.mexico-first.org/templates/mexico_first/4aconv/Formato%20Aviso%20Expresi%C3%B3n%20inter%20A9s%20%283%29..pdf), recuperado el 1 de diciembre del 2015.
- [11] R. Montante, Z. Khan, "Specialized Certification Programs in Computer Science". Proceedings of the thirty-second SIGCSE technical symposium on Computer Science Education. Vol. 33. Num. 1 March 2001, pp. 371-375.
- [12] P. Vance, "Network + Certification for the Computer Science or Electrical Engineering Undergraduate". Journal of Computing in Small Colleges (JCSC). Vol. 21. June 2006. Pp. 140-148.
- [13] Simmonds, "Student Learning Experience with an Industry Certification Course at University". The Fifth Australasian Computing Education Conference (ACE2003). Vol. 20. February 2003. Pp. 143-148
- [14] K.Sutliff, "Integrating Academics and Industry: A Challenge for Both Sides". ACM Journal of Computer Documentation. (24:1), 2000, Pp. 33-38
- [15] w3schools. Sitio oficial (s.f.). [www.w3schools.com](http://www.w3schools.com). Diciembre del 2015
- [16] MexicoFirst. Catálogo oficial de certificaciones. <http://www.catalogo.mexico-first.org/>. Agosto del 2016
- [17] Microsoft. Políticas de exámenes de certificación. <https://www.microsoft.com/es-mx/learning/certification-exam-policies.aspx#scoring>. Agosto del 2016

- [18] MongoDB. Examen de certificación para DBA. <https://university.mongodb.com/exam/DBA/about>. Agosto del 2016.
- [19] EnterpriseDB. Preguntas frecuentes de las certificaciones de EnterpriseDB. <http://www.enterprisedb.com/products-services-training/postgresql-certification/certification-faq>. Agosto del 2016.
- [20] Oracle. Oracle 12c SQL. [http://education.oracle.com/pls/web\\_prod-plqdad/db\\_pages.getpage?page\\_id=5001&get\\_params=p\\_exam\\_id:1Z0-071](http://education.oracle.com/pls/web_prod-plqdad/db_pages.getpage?page_id=5001&get_params=p_exam_id:1Z0-071). Agosto del 2016.
- [21] ANIEI. Modelos Curriculares del Nivel Superior de Informática y Computación. [http://www.aniei.org.mx/Archivos/7-Modelos\\_curriculares\\_ES2013\\_F%20.pdf](http://www.aniei.org.mx/Archivos/7-Modelos_curriculares_ES2013_F%20.pdf). Agosto del 2016.

# **ANÁLISIS CUALITATIVO PARA LA DETECCIÓN DE FACTORES QUE AFECTAN EL RENDIMIENTO ESCOLAR: ESTUDIO DE CASO DE LA LICENCIATURA EN TECNOLOGÍAS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN**

***Rocío Abascal Mena***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*mabascal@correo.cua.uam.mx*

***Erick López Ornelas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*elopez@correo.cua.uam.mx*

***Sergio Zepeda Hernández***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*jzepeda@correo.cua.uam.mx*

## **Resumen**

En muchas ocasiones, los profesores, debido a un bajo rendimiento escolar emplean soluciones orientadas a la creación de nuevas técnicas de enseñanza-aprendizaje olvidando, en ellas, el sentir de los alumnos en este proceso. En este artículo, se presentan los resultados obtenidos a partir de una investigación cualitativa bajo el método de grupos de enfoque con el fin de determinar el sentir de los alumnos y poder conocer algunos de los factores que inciden en sus estudios. Los resultados obtenidos muestran que los principales factores asociados al rendimiento escolar son variados, entre los que se incluyen:

- La elección de la Universidad como segunda opción.
- Las expectativas contra la realidad del plan de estudios.
- Los factores internos y externos relacionados con el entorno social.
- Las estrategias de enseñanza-aprendizaje utilizadas por los profesores.



Los resultados encontrados son interesantes ya que estos pueden servir de guía en la adecuación o actualización de planes de estudio tomando en cuenta factores sociales relacionados con el desempeño del alumno.

**Palabras Clave:** educación, didáctica, investigación educativa, programas estudio, proceso de enseñanza-aprendizaje.

## 1. Introducción

De manera continua las evaluaciones de las licenciaturas se realizan a través de métodos cuantitativos, (cantidades altas o bajas), cuando éstas reportan números bajos se hace énfasis en elevar el número de egresados y buscar alternativas para disminuir el número de alumnos rezagados en materias que son por naturaleza más difíciles. Bajo este contexto, regularmente se buscan alternativas que únicamente involucran a los profesores para tratar de resarcir la problemática.

El proceso de enseñanza-aprendizaje es muy complejo debido a que requiere de contenidos ordenados que favorezcan el aprendizaje tomando en cuenta expectativas, motivaciones y objetivos tanto de los alumnos como del profesor. Para poder ahondar en estas necesidades es importante considerar que el alumno está conectado con procesos sociales, internos y externos, que influyen directamente en su desempeño académico. Según [1] existen siete elementos que definen y caracterizan a las aulas donde los alumnos alcanzan menores resultados de lo que sería esperable los cuales son:

- Bajas expectativas generalizadas hacia los alumnos.
- Poco énfasis en la supervisión del trabajo.
- Interacción pobre entre docente y alumnos.
- El proceso de enseñanza-aprendizaje requiere de poca o nula participación por parte de los alumnos.
- Los alumnos tienen la creencia de que a los profesores no les importan si aprenden o no.
- Evaluación crítica.
- Retroalimentación negativa.

Por su parte, [2] establece la existencia de un conjunto de variables que pueden estar englobadas en cinco estímulos y que, finalmente, afectan el rendimiento escolar:

- Ambiente inmediato.
- Estímulos emocionales.
- Necesidades sociológicas.
- Necesidades físicas.
- Necesidades psicológicas.

De igual manera, [3] comparó la información de ingreso de 572 alumnos con las calificaciones obtenidas durante el primer año. Los datos fueron analizados utilizando técnicas clásicas de análisis estadístico concluyendo que:

- El género no es un determinante significativo en los resultados académicos.
- La nota de acceso es un factor directo y relevante en el rendimiento académico
- El orden de preferencia con la que un alumno accede en primera opción es un factor que generará notas más elevadas, entre otras.

En este caso, es importante resaltar que el estudio es cuantitativo y que no hay ninguna referencia a la percepción del propio alumno, sus motivaciones y objetivos.

El estudio de las aulas y la motivación de los alumnos para afrontar los retos que impone un nuevo curso y su educación es un tema primordial en el campo de la investigación docente. A partir de la publicación del informe de [4] han existido diversos estudios enfocados en determinar los factores que determinan la eficiencia académica. Así pues: *Conocer los diferentes factores que inciden en el rendimiento académico en el campo de la educación superior de una manera más integral, permite obtener resultados tanto cualitativos como cuantitativos para propiciar un enfoque más completo en la toma de decisiones para mejorar los niveles de pertinencia, equidad y calidad educativa* [5].

Por lo general, la investigación que se lleva a cabo, en el área de la docencia, se encuentra dentro del marco de grandes proyectos educativos en los que se requiere valorar, examinar y analizar un conjunto de características importantes. Sin embargo, para el docente que busca respuestas para poder diagnosticar y orientar su clase no existen herramientas adecuadas que le permitan diagnosticar y conocer al alumno quedándose sólo con medidas obtenidas a través de exámenes y evaluaciones cuantitativas.

Estas evaluaciones no reconocen los diversos procesos cualitativos en juego, ni los esfuerzos de los docentes por adaptar los programas generales a las necesidades del contexto actual de los alumnos. En la investigación cuantitativa se trata de demostrar cómo una variable tiene una correlación significativa con el desempeño escolar. Estas técnicas pueden complementarse con estudios etnográficos, observación y grupos focales, las cuales tienen el objetivo de escuchar, comprender y analizar al alumno en un ambiente de confianza. Es precisamente, en los grupos focales o de enfoque que sitúa el presente artículo.

Para conocer las motivaciones y factores que afectan el rendimiento escolar se realizó un estudio cualitativo bajo la siguiente hipótesis  $H_0$ :

- para el alumno la Universidad en la que se encuentra inscrito, en este caso la UAM, no es su primera opción.
- El profesor también puede ser un factor determinante para motivar a los alumnos.

La validación de la hipótesis se realizó a partir de un análisis en profundidad con alumnos de la Licenciatura en Tecnologías y Sistemas de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Cuajimalpa. En dicho análisis se contrasta la información proveniente de alumnos que están en su primer año con aquella obtenida con alumnos que están por finalizar su carrera. A partir de ello se pretende tener una comprensión más profunda de los factores que afectan el rendimiento escolar a lo largo de la carrera universitaria. Si bien, las motivaciones pueden variar a lo largo de una carrera universitaria es importante mostrar que hay

factores que influyen en estos cambios y que provienen directamente del entorno que rodea a los alumnos: universidad, profesores, contenido de los cursos, etc.

## **2. Desarrollo**

Existen numerosas investigaciones sobre los factores que intervienen en el desempeño académico en las que se menciona que el primer curso de carrera resulta ser el más importante en lo que se refiere a la evolución de los estudios. Así el 75% del alumnado que no completa la carrera atribuye la principal razón del fracaso a problemas experimentados durante el primer año [6]. De igual manera, [7] afirman que al final del primer año de universidad es cuando se produce la reducción más intensa de las cohortes y cuando se producen los bajos resultados que alargarán la estancia en la universidad hasta conseguir la titulación. En múltiples ocasiones, el rendimiento y seguimiento de los alumnos ha estado ligado a las calificaciones que obtienen considerándose un factor de calidad de la institución y del propio proceso de enseñanza-aprendizaje.

Considerando la importancia que tiene el conocer las motivaciones y factores que afectan el rendimiento escolar de un alumno durante su primer año en el nivel superior, se planteó la necesidad de realizar una investigación cualitativa, que nos permitiera conocer qué sucede en el sentir de los alumnos cuando están iniciando sus cursos de nivel superior, dadas las experiencias previas de bachillerato y secundaria, contrastada con alumnos que están finalizando su carrera.

Debido a la naturaleza de la investigación cuya finalidad es encontrar información más profunda sobre qué siente y cómo vive su escolaridad un alumno cuando ingresa al ambiente universitario, se determinó realizar una investigación cualitativa usando la técnica de grupos focales.

Los grupos focales son una técnica de recolección de datos mediante una entrevista grupal semiestructurada, la cual gira alrededor de una temática propuesta por el investigador. A través de ellos se puede conocer información profunda proveniente de datos descriptivos. Los grupos focales facilitan la interacción social en la cual las personas tratan de explicar su visión. El resultado

es una visión general a través de una construcción grupal participativa, de cierto contexto, problema o situación.

Se han dado diferentes definiciones de grupo focal; sin embargo, algunos autores convergen en que éste es un grupo de discusión, guiado por un conjunto de preguntas diseñadas cuidadosamente con un objetivo particular [8 y 9].

Los grupos focales permiten obtener mayor información que cuando se usa la entrevista como medio, debido a que un grupo focal relaja la inhibición permitiendo un amplio rango de participación. Para que este proceso sea exitoso es necesario cumplir con diversos requerimientos como lo es la homogeneidad de los participantes así como cumplir con diversas directivas en cada una de las sesiones, desde las de conducción hasta las contextuales en el lugar de reunión.

El propósito principal del grupo focal es hacer que surjan actitudes, sentimientos, creencias y sobre todo experiencias en los participantes; esto no sería fácil de lograr con otros métodos. Además, los grupos focales permiten obtener una multiplicidad de miradas y procesos emocionales dentro del contexto del grupo [10].

Dado el tipo de información que deseamos obtener los grupos de enfoque son una herramienta acorde a nuestro propósito de investigación.

### **3. Método**

El rigor metodológico es lo que avala la validez de los resultados obtenidos, es por eso que a continuación se presentan las principales etapas utilizadas para la realización tanto de los grupos focales como de la investigación, figura 1.

#### **Establecimiento de los objetivos**

El objetivo planteado en la presente investigación, tiene que ver no sólo con el descubrimiento de los factores que afectan el rendimiento escolar sino el identificar claramente el proceso y qué información se desea obtener de cada grupo focal. Estamos convencidos que a partir del descubrimiento de dichos factores, se podrá hacer un diagnóstico preciso sobre la Licenciatura en

Tecnologías y Sistemas de Información de la UAM-Cuajimalpa, y proponer mejoras que permitan mejorar el rendimiento escolar de los alumnos.

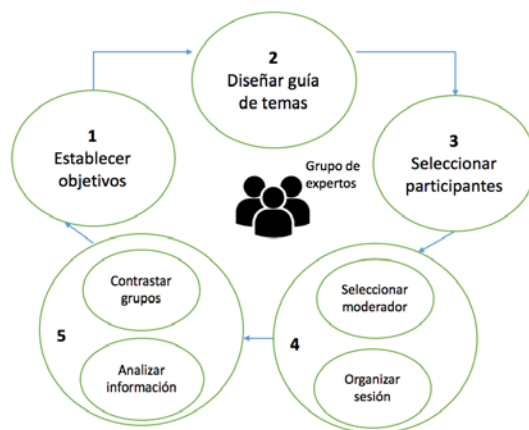


Figura 1 Método utilizado.

### Diseño de la guía de temas

Una sesión de grupo de enfoque necesita de una guía que permita orientar la discusión de los temas de interés. La investigación propuesta está basada en la información cualitativa a partir de la aplicación de los grupos focales, por lo que los temas seleccionados resultan importantes. Se decidió que el conjunto de preguntas debían ser concretas, estimulantes y flexibles y, guiando la discusión de lo más general a lo específico. Inicialmente nos interesamos en los motivos de la selección de la Licenciatura, para poder conocer los medios, situaciones o impulsos que llevaron a los alumnos a tomar la decisión. Se decidió, entonces, elaborar las siguientes preguntas: *¿Por qué medio te enteraste de la Licenciatura? ¿Qué sabías y qué te imaginabas de la Licenciatura? ¿Por qué elegiste estudiar la Licenciatura? ¿Alguien influyó en tu decisión?*

En una segunda etapa nos interesaba indagar sobre las causas del bajo rendimiento escolar y poder determinar los factores motivantes y desmotivantes en torno a la Licenciatura. Se decidió, de esta forma, preguntar: *¿Qué factores externos afectan tus estudios? ¿Crees que los problemas familiares y personales podrían afectar tu rendimiento escolar? ¿Qué factores internos, que rodean a la*

*Licenciatura, afectan tus estudios? ¿Qué te motiva y desmotiva para realizar tareas de la Licenciatura?*

### **Selección de los participantes**

Para la selección de los participantes, la literatura recomienda tener en cuenta la edad, el sexo, las condiciones socioeconómicas, el nivel educativo, el estrato social, las actitudes y el lugar de residencia (urbana o rural). Los participantes son seleccionados específicamente porque tienen alguna experiencia en común o personal que resulta de interés para el estudio [11 y 12].

En este caso, la experiencia en común fue que todos los participantes debían pertenecer a la Licenciatura en Tecnologías y Sistemas de la Información. A partir de este hecho, se generaron 3 diferentes grupos de alumnos: el primer grupo se conformó con alumnos de nuevo ingreso y que estaban todos en su primer año dentro de la Licenciatura. Para la conformación del segundo grupo se buscaron alumnos intermedios dentro de la Licenciatura, que estuvieran en su segundo o tercer año. Finalmente, el tercer grupo quedó conformado con alumnos de último año de la Licenciatura y a los que sólo les faltaba máximo dos cursos para terminar el plan de estudios.

### **Selección del moderador y el desarrollo de la sesión**

Inicialmente, la investigación se centró en los motivos por estudiar una Licenciatura, y de este modo poder conocer los medios, situaciones o impulsos que llevaron a los alumnos a tomar la decisión. Una vez generadas las preguntas de interés para la investigación se procedió a la selección del moderador que conduciría la sesión. De preferencia no debía de haber tenido ningún trato y/o relación con el grupo de enfoque, esto quiere decir una persona diferente al profesor. A su vez, el moderador debería tener un buen conocimiento de la problemática a afrontar, para así conducir las preguntas y orientar la discusión hacia los temas de interés. Así, se buscó que el moderador, además de tener manejo en dinámicas de grupo fuera una persona sensible para captar y explorar en profundidad los temas a debatir.

## **Contraste en los grupos de enfoque y el análisis de la información**

Al terminar cada una de las sesiones se resumió inmediatamente la discusión que se desarrolló en el grupo, se respetaron las mismas palabras utilizadas por los participantes; además, se transcribieron las grabaciones, para permitir la reconstrucción de lo tratado pregunta por pregunta. Finalmente, se realizó una comparación entre los distintos grupos para identificar respuestas comunes y discrepancias, buscando comentarios sorprendidos o reacciones tanto positivas como negativas. En la sección siguiente identificamos los principales hallazgos generados a partir de los grupos focales.

## **4. Resultados**

Una vez generado todo el contexto y requerimientos para la realización de las sesiones de los grupos focales se procedió a la obtención de datos. Cada sesión tuvo en promedio 40 minutos, 10 participantes por sesión buscando homogeneidad en cuanto a sexo y edades. Se realizaron 4 sesiones, las cuales se tenían observadores que hacían anotaciones, además de realizar grabaciones en audio y realizar transcripciones de las mismas para su posterior análisis y generación de un informe con datos obtenidos de las sesiones.

A continuación presentamos un análisis de los resultados encontrados, a través de tablas para facilitar su lectura, dentro de los siguientes rubros:

- Elección de la Universidad como segunda opción;
- Expectativas contra la realidad del plan de estudios;
- Factores, internos y externos, relacionados con el contexto social;
- Estrategias de enseñanza-aprendizaje utilizadas por los profesores.

### **La elección de la Universidad como segunda opción**

La tabla 1, nos muestra que los alumnos de nuevo ingreso como primera opción para entrar a la Universidad eligieron a la UNAM. Esto significa que los alumnos llegan a nuestras licenciaturas después de no haber conseguido el acceso a sus primeras opciones, lo cual puede ser un indicio de tener el sentir de estar en una universidad que no tiene todas las características que buscan y que no está al



nivel. Esto lo describe [3], refiriéndose a que el orden de preferencia con la que un alumno accede en primera opción es un factor que generará notas más elevadas.

Tabla 1 La UNAM predomina como primera opción para ingreso.

	¿Cuál fue tu primera opción de universidad?
1	UNAM, Politécnico, UAM (una gran mayoría).
2	UNAM, UAM, Politécnico (una minoría).

### Las expectativas contra la realidad del plan de estudios

La tabla 2 nos muestra que la principal fuente de información al buscar otras opciones es Internet. Igualmente, el alumno busca el plan de estudios a la hora de elegir una carrera. Sin embargo, los alumnos difícilmente pueden entender el contenido de una materia con sólo leer el plan de estudios y queda una vaga idea de lo que podrán lograr a lo largo de la Universidad.

Como se muestra en la tabla 2, algunos alumnos mencionan que les gustó el plan de estudios aunque la gran mayoría sólo revisa lo concerniente al perfil de egreso.

Tabla 2 Internet y la publicación del plan de estudios es fuente de decisión.

	¿Cómo te enteraste de la licenciatura que cursas?
1	Fue mi última opción me enteré por la página de Internet. Vi el plan de estudios, los horarios y me gustó.
2	Al no ingresar a la UNAM empecé a buscar más opciones, busqué en Internet. Me gustó el plan de estudios, aunque no conocía la escuela, no sabía ni que existía.
3	Recomendación de una amiga que estudiaba en la UAM, vi el plan de estudios y me gustó.
4	Soy foráneo y la conocí por Internet, me agrado el plan de estudios.

La tabla 3 nos muestra que la causa de selección de la licenciatura fue por voluntad propia. En segundo lugar se expresó una influencia de su decisión a través de familiares muy cercanos, padres, hermanos o primos con experiencia en alguna de las áreas de interés. Y, la tercera fue la relación con el trabajo, dado que ya trabajan en el área como ayudantes o cercanos a gente que ejerce

profesionalmente. En este caso, la idea sobre una realidad económica y social diferente (mejores condiciones en el trabajo o familiares exitosos) hacen que el alumno elija una carrera no necesariamente en base a sus habilidades sino a sus expectativas de mejora.

Tabla 3 Tres principales factores para selección de la licenciatura.

	¿Alguien influyó en tu decisión de estudiar esta licenciatura?
1	Propia voluntad.
2	Familiares que ya tienen experiencia en el área.
3	Relación con mi trabajo.

### Los factores, internos y externos, relacionados con el contexto social

La tabla 4 presenta que uno de los principales factores que afectan el rendimiento escolar tiene relación con una cantidad cada vez mayor de alumnos que trabajan. Por otra parte, existe una clara preocupación por la situación económica que a veces les toca vivir. Se describen también los tiempos de traslado: *“trabajar me quita tiempo”, “la distancia me quita mucho tiempo, hago 3 horas desde Coacalco”, “el trabajo influye en mi rendimiento porque trabajo 4 días”*. Muchas de las veces son entre dos a tres horas en un trayecto, por lo cual se está hablando del promedio de cuatro a seis horas únicamente en traslado, lo que consecuentemente produce un desgaste físico y emocional: *“Traslado, 2 horas o 2 horas y media, la pesadez del viaje, llego cansado sin comer”, “el trabajo por las tardes, hay que sacarlo y es prioridad, la familia, ya con pareja y nena, es factor motivacional pero hay que dedicarle tiempo, el tiempo, no tengo tiempo libre y no puedo hacer tareas”*.

Tabla 4 Factores externos que inciden en el rendimiento

	¿Factores externos que influyen en tu rendimiento?
1	Trabajo.
2	Situación económica.
3	Tiempos de traslado.
4	Motivación.

La tabla 5 muestra la relación que existe de un círculo social cercano para seguir estudiando. Principalmente, la familia y los compañeros son los estímulos más cercanos a con los que un alumno tiene contacto y que pueden o no influenciar de manera positiva. En cuanto a factores que los motivan están: *“poner una empresa y superarme como persona”, “querer desarrollar tecnología”*. Para algunos es crucial estudiar: *“lo que hagamos ahorita puede ser lo que hagamos en nuestra vida”, “no es estudiar cualquier cosa, es ir más allá”*.

Tabla 5 Factores motivantes para seguir los estudios.

	<b>¿Factores motivantes para continuar estudiando?</b>
1	Mi familia y la gente que me mantiene y por lo que puedes llegar a ser en el futuro. Hay profesores que te tienden la mano y te dicen yo te ayudo y se va a sentar junto a ti y te explica.
2	Mis compañeros y profesores, teníamos una profesora que ahí estaba con nosotros, y tengo un compañero en especial que siempre llega y me dice échale ganas, tú puedes.
3	Había un profesor que pasaba con cada uno y le dedicaba tiempo a cada persona y así toda la clase y eso estaba bien.

Cuando se mencionan factores como la infraestructura, la gran mayoría de los alumnos coinciden en que una universidad “bonita” o donde el ambiente es saludable les permite entusiasmarse por estudiar (ver tabla 6).

Tabla 6 Factores del contexto que motivan a seguir estudiando.

	<b>¿Factores del contexto motivantes?</b>
1	Las instalaciones me gustan mucho, en comparación a otras universidades, la biblioteca esta chiquita, el ambiente escolar es bueno.
2	La gente en esta etapa escolar, he estado en otras escuelas privadas y públicas, no me gusta el ambiente de las privadas, aquí es otra etapa y otro nivel, me agradan las instalaciones y actividades, aunque faltan más.
3	Me han tocado profesores que me han apoyado lo suficiente, las instalaciones también son buenas, y si te motivan a hacer algo.

### **Las estrategias de enseñanza - aprendizaje utilizadas por los profesores**

Es importante mencionar que una de las preguntas que se realizó fue: *¿Cómo influye la técnica de enseñanza de un profesor en el curso?* tomando en cuenta

que el profesor es uno de los factores que pueden motivar a que un alumno tenga un rendimiento adecuado o siga sus estudios. En general, las respuestas son contundentes en el sentido en que se menciona por ejemplo que: *“Definitivamente un profesor puede hacer que ames u odies la materia”* o *“sí por supuesto, ya que el profesor es la guía de la enseñanza y su técnica es el motor de la motivación y desempeño”*. Las principales respuestas están relacionadas con los métodos de enseñanza-aprendizaje que el docente aplica en su clase.

Tabla 7 Influencia del docente en la motivación del alumno.

	<b>¿Cómo influyen las técnicas de enseñanza-aprendizaje del profesor en la motivación del alumno?</b>
1	Sí [influyen] dado que siempre es difícil aprender uno sólo, sobre todo cuando son temas desconocidos.
2	Sinceramente creo que sí influye la enseñanza de un profesor para el desempeño de un alumno, ya que cada profesor tiene una forma muy diferente de explicar y cada persona alumno tiene una forma muy diferente de captar y retener información.
3	Sí, creo que el profesor afecta si una materia es fácil, difícil, divertida o aburrida.
4	Si él o ella marcan la pauta y son quienes te pueden crear interés o quitártelo, de acuerdo a cómo lo muestren.

## 5. Discusión y conclusiones

En la investigación utilizando técnicas de análisis cuantitativo se trata de demostrar cómo una variable tiene una correlación significativa con el desempeño escolar. Estas técnicas pueden complementarse con estudios etnográficos, observación y grupos focales, las cuales tienen el objetivo de escuchar, comprender y analizar al alumno en un ambiente de confianza.

Como se mencionó anteriormente, la mayoría de las investigaciones acerca de los factores que afectan el rendimiento académico están, principalmente, enfocadas en análisis cuantitativos tomando en cuenta número de veces que se ha cursado una materia, calificaciones, tiempo transcurrido entre el ingreso y el egreso, etc. Pocas investigaciones exploran el problema a partir de técnicas cualitativas en las que el alumno es concebido como un ser integral en el que diversos factores, externos e internos, pueden afectar su rendimiento.

Los resultados obtenidos muestran que los principales factores asociados al rendimiento escolar son variados, entre los que se incluyen:

- Elección de la Universidad como segunda opción.
- Expectativas contra la realidad del plan de estudios.
- Factores, internos y externos, relacionados al contexto social.
- Estrategias de enseñanza-aprendizaje utilizadas por los profesores.

Resulta interesante poner especial énfasis en que los alumnos que ingresan a la Universidad compitieron por un lugar en varias instituciones antes de seleccionar o ser aceptados en una. Sin embargo, en la gran mayoría, al no haber sido seleccionados en su primera opción crea una decepción que aunado a expectativas diferentes conduce a una pronta deserción. Sin embargo, es importante resaltar que el profesor puede influir en la motivación del alumno siendo el principal eje en el proceso de enseñanza-aprendizaje. De igual manera, es importante considerar la realización de cambios en los planes de estudio que involucren más al alumno en su propio aprendizaje aprovechando el tiempo que se encuentra dentro de las instalaciones. El no tomar en cuenta el desplazamiento como la existencia de alumnos que trabajan es un grave error al pensar únicamente en alumnos de tiempo completo dedicados únicamente a sus estudios.

En este artículo se presentó un análisis del rendimiento escolar basado en una técnica cualitativa de investigación: el grupo focal. Esta técnica puede estar al alcance del propio docente para indagar y propiciar la comunicación dentro del aula. El grupo focal es propicio para generar un ambiente de confianza en el que se pueden explorar distintas temáticas encaminadas a conocer al alumno para orientar de una mejor manera el proceso de enseñanza-aprendizaje.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] P. Sammons, "School effectiveness and equity: Making connections". Reading: CfBT. 2007
- [2] A. Honigsfeld, R. Dunn, (2006). "Learning-Style Characteristics of Adult Learners". Delta Kappa Gamma Bulletin. Vol. 72. No. 2. 2006.

- [3] J. L. Jiménez-Caballero, J. A. Camúñez Ruiz, M. R. González-Rodríguez, P. Fuentes Ruiz, "Factores determinantes del rendimiento académico universitario en el Espacio Europeo de Educación Superior". *Innovar*. Vol. 25 No. 58. 2015. Pp. 159-176.
- [4] J. S. Coleman, E. Q. Campbell, C. J. Hobson, J. MacPartland, A. M. Mood, F. D. Weinfeld, R. L. York, *Equality of Educational Opportunity*. (Washington, DC, US Government Printing Office). 1964. National Center for Educational Statistics. Washington, DC.
- [5] G. Vargas, M. Guiselle, "Factores asociados al rendimiento académico en alumnos universitarios, una reflexión desde la calidad de la educación superior pública". *Revista Educación*. Vol. 31. No. 1. 2007. Pp. 43-63.
- [6] V. Tinto, Keynote address to the Inaugural Pan Pacific First Year Experience Conference, Brisbane, Australia. En Häkkinen, L., *Do University Entrance Exams Predict Academic Achievement?* Sweden: Department of Economics, Uppsala University. 1995.
- [7] E. Birch, P. Miller, "A national study of students' performance at university". *Australasian Journal of Economics Education*, Vol. 4. Issue 2. 2007. 223-236.
- [8] La técnica de recolección de información mediante los grupos focales. [http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/texto/14/grupos\\_focales.htm](http://ccp.ucr.ac.cr/bvp/texto/14/grupos_focales.htm). Octubre de 2008
- [9] M. Beck, A. Bryman, L. Futing, "The Sage Encyclopedia of Social Science Research Methods". SAGE Publications. Vols. 1-3. 2004.
- [10] A. Gibb, "Focus groups". *Social Research Update*, Vol. 5. N. 2. 1997. Pp. 1-8.
- [11] G. Myers, "Displaying opinions: topics and disagreement in focus groups". *Language in Society*, Vol. 27. N. 1. 1998. Pp. 85-111.
- [12] J. Kitzinger, "Education and debate Qualitative Research: Introducing focus groups". *Sociology of Health*. Vol. 311. 1995. Pp. 299-302.

## **7. Autores**

Rocío Abascal-Mena es Profesor Investigador en el Departamento de Tecnologías de la Información de la Universidad Autónoma Metropolitana - Cuajimalpa en la Ciudad de México. Realizó su doctorado en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (INSA) de Lyon, Francia, en el 2005. Sus intereses actuales de investigación incluyen: desarrollo y explotación de bibliotecas digitales, Web semántica, recuperación y análisis de información, Interacción Humano-Computadora y análisis de redes sociales.

Erick López-Ornelas es Profesor Investigador en el Departamento de Tecnologías de la Información de la Universidad Autónoma Metropolitana - Cuajimalpa en la Ciudad de México. Recibió su doctorado en Informática en la Universidad Paul Sabatier de Toulouse Francia, en el 2005. Sus intereses de investigación incluyen: visualización de información, análisis de redes sociales y la Interacción Humano Computadora.

Sergio Zepeda Hernández obtuvo su Doctorado en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN en 2009. Actualmente es Profesor-Investigador del Departamento de Tecnologías de la Información de la División de Ciencias de la Comunicación y Diseño, de la Universidad Autónoma Metropolitana. Pertenece al Cuerpo Académico Interacción y Sociedad, sus intereses de investigación son: Educación, Interacción Social, Sociedades Digitales, Experiencia de Usuario, Interacción Humano-Computadora, Sistemas de Información y Análisis de Redes Sociales.

# PROPUESTA DE DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN MÓVIL INTERACTIVA PARA APOYAR EL APRENDIZAJE EN EDUCACIÓN BÁSICA: HISTORIA DE MÉXICO, UNA NECESIDAD

***Paula García Lucas***

Universidad de la Sierra Sur  
*pgl.atmr@gmail.com*

***Víctor Alberto Gómez Pérez***

Universidad de la Sierra Sur  
*vgomez@unsis.edu.mx*

***Arturo Benítez Hernández,***

Universidad de la Sierra Sur  
*abenitez@unsis.edu.mx*

***Jesús Cruz Ahuactzi***

Universidad de la Sierra Sur  
*ahuactzi@unsis.edu.mx*

## **Resumen**

El incremento de las nuevas tecnologías en el ámbito educativo, ha permitido ampliar el horizonte de conocimientos, lo cual mejora las habilidades en su uso y la obtención de nuevos conocimientos para el ser humano. El uso de las nuevas tecnologías puede mejorar el proceso de enseñanza ya que presenta posibilidades de introducir material actual, innovador e interactivo entre profesores y estudiantes. El objetivo de este trabajo es proponer un primer diseño de una aplicación móvil para apoyar el aprendizaje en la materia de Historia de México, la cual pretende ser una herramienta que proporcione a profesores que imparten dicha materia a nivel primaria, una forma de apoyo didáctico para el correcto aprendizaje de sus alumnos.



**Palabra(s) Clave(s):** Aplicación móvil, enseñanza, historia de México, propuesta de diseño.

## **1. Introducción**

En los últimos años, los dispositivos móviles forman parte de nuestra vida cotidiana, ya sea en la casa, oficina o escuelas, lugares donde se ha incrementado el uso de dichos dispositivos. En escuelas a nivel primaria se usan para el aprendizaje en diferentes áreas, especialmente en matemáticas, español, ciencias naturales e historia [7].

El incremento de las nuevas tecnologías en el ámbito educativo, ha permitido ampliar el horizonte de conocimientos, lo cual mejora las habilidades en su uso y la obtención de nuevos conocimientos para el ser humano [9]. El uso de las nuevas tecnologías puede mejorar (o ayudar) el proceso de enseñanza ya que presenta posibilidades de introducir material moderno. Una de las materias abstractas a nivel primaria es la de historia de México y por tal motivo se han encontrado en poca medida aplicaciones de software que permitan a los niños mejorar su aprendizaje en esta materia.

La mayoría de las aplicaciones educativas que se encuentran en Internet son de paga o gratuitas con acceso a otros módulos de paga, y están diseñadas para las asignaturas de matemáticas, español y ciencias naturales. Con respecto a la materia de historia existen propuestas para usar líneas de tiempo alojadas en un servidor, éstas trabajan de forma colaborativa, con el uso del Bluetooth para compartirlas en los dispositivos móviles. Hay aplicaciones que ofrecen cursos e información del área de historia en diferentes países (e.g., Estados Unidos, Canadá, Inglaterra y Chile), pero están en otros idiomas y el contenido no corresponde al de la asignatura de historia de México.

Las aplicaciones móviles por lo general son comerciales, siendo ésta una posible causa por la cual los usuarios no hacen uso de ellas. Por otra parte las plataformas en línea que ofertan cursos y juegos requieren de una cuota para poder ver el contenido que ofrecen, lo cual es casi imposible para los niños que deseen acceder, lo puedan hacer. Esta situación podría ser distinta al usar

software libre, que permite crear aplicaciones implementando herramientas Open Source para su diseño además de agregar nuevas funcionalidades para seguir ampliando dicha aplicación y con la reducción de costos para el acceso de los usuarios [2].

En el presente artículo se presenta una propuesta de diseño para su posterior construcción de una aplicación móvil para apoyar el aprendizaje en la materia de Historia de México, la cual pretende ser una herramienta que proporcione a profesores que imparten la materia de historia de México a nivel primaria, una forma de apoyo didáctico para el correcto aprendizaje de sus alumnos. El artículo está estructurado de la siguiente forma, después de haber hecho una introducción, se presenta en la sección número 2 el marco teórico que pretende mostrar conceptos que se utilizan en este tema de investigación, posteriormente en la sección 3 se presenta el estado del arte, donde se hace un estudio comparativo entre sistemas que tratan de apoyar al estudio de la materia de historia de México. En la sección 4 se presenta el diseño de la aplicación y un posible escenario de uso de la misma, asimismo en la sección 5 se presentan las conclusiones de la investigación, a continuación en la sección 6 se muestra un listado con las referencias utilizadas para dar soporte a este trabajo y finalmente en la sección 7 se describe una breve reseña de los autores de esta investigación.

## **2. Marco teórico**

En el nivel de educación básica existen competencias descritas en el plan de estudio para las diversas materias de los diferentes grados que se deben cumplir. Las actividades trabajadas con los alumnos como estrategias para enseñar temas, en este caso, historia de México son importantes que cumplan con las competencias establecidas en el plan de estudios. Algunas de estas actividades al utilizar herramientas como enciclopedia son los juegos de mesa, mapas mentales, mapas conceptuales y líneas de tiempo [6].

Los planes de estudios, también llamados programas de estudio, guían a los profesores en la preparación de sus clases. Pero es importante mencionar la

dificultad que representa tanto para el profesor, como para el alumno el comprender hechos históricos.

En [3] se muestra que en países como Venezuela el uso de las tecnologías en el manejo de la comprensión del tiempo y espacio históricos es una de las competencias para el aprendizaje. Con lo que se pretende que el alumno pueda ubicar geográficamente e identificar hechos o acontecimientos de la historia en dichos lugares.

Con el paso del tiempo se van construyendo hechos históricos y se generan nuevos conocimientos, además, con la nueva era digital, se crea conocimiento referente a la historia. Los alumnos deben ser capaces de criticar y reflexionar la información que se maneja, por ello, la otra competencia que incluye en el plan de estudios de la materia de historia es el fomentar en los alumnos la capacidad de crítica y de reflexión frente a las fuentes de información que se consultan [7]. La finalidad de las competencias para cada materia que se imparte, es proporcionar al profesor los objetivos que se deben cumplir a aplicar estrategias, las cuales son actividades aplicadas a los alumnos para mejorar su aprendizaje y generar nuevas formas de enseñar basadas en las competencias.

### **Tecnología educativa**

En los últimos años, la tecnología se ha usado como una herramienta de enseñanza dentro de las escuelas, a esto se le conoce como tecnología educativa. En los equipos que están inmersos no solo se incluyen *notebooks* y computadoras de escritorio sino también se incluyen dispositivos móviles.

La tecnología dentro de las escuelas, juega un papel importante para el proceso de enseñanza aprendizaje de los alumnos desde el nivel preescolar hasta el superior. El uso de la tecnología dentro del área educativa beneficia a los alumnos en la realización de tareas, generación de aprendizaje mediante el acceso a documentos, imágenes y datos de utilidad, que mejoran el trabajo cooperativo e individual.

La tecnología educativa, es sustentada gracias a la integración de las tecnologías de la información dentro de las escuelas, con la finalidad de ayudar en los

procesos educativos [7]. La tecnología educativa se ha presentado como la innovación acorde con las exigencias de la sociedad del conocimiento, sin embargo, para poder dar respuestas a las demandas surgidas en la nueva dinámica de la sociedad, es necesario que los docentes cuenten con herramientas que les permiten actuar en razón de los cambios en educación a raíz de las modificaciones efectuadas como parte del fenómeno de globalización.

### **Los juegos como estrategias de estudio**

En las escuelas se trabajan diferentes estrategias para diversos temas que engloban la historia de México. Las estrategias aplicadas a los niños en muchas ocasiones se repiten en los diferentes grados de la escuela primaria, sin embargo, para cada grado cambia el contenido [4, 10]. A continuación se darán a conocer los juegos usados como estrategias de enseñanza aprendizaje aplicados a los niños de las escuelas primarias.

- Dominó: es un juego de mesa de 28 fichas, el objetivo es ir relacionando de cada ficha de acuerdo con el número de puntos de las caras de cada ficha.
- Serpientes y escaleras: se necesita un dado, objetos que identifican al jugador y el tablero del juego. Este juego consiste en tirar el dado y de acuerdo al número avanzar en el tablero colocando el objeto identificador.
- Memorama: lo conforma un conjunto de fichas en pares que muestran la misma imagen, o bien, una ficha puede contener una pregunta y la otra contiene la respuesta.
- Sopa de letras: es un tablero de letras que contiene palabras escondidas de un tema. El objetivo es encontrar las palabras encerrándolas en un ovalo.
- Laberinto: se usa como un mapa con muchos caminos con o sin salida para llegar a una meta.
- Adivina qué es: se dan características de algún objeto hasta que se adivine el nombre del objeto.

- Lotería: se necesita un tablero con imágenes de objetos con su nombre, objetos para señalar las imágenes que menciona la persona quien tiene un conjunto de tarjetas con los mismos objetos del tablero.
- Turista: se colocan un mapa con lugares identificados y se necesita un conjunto de preguntas el cual permitirá conocer algún lugar en específico.
- Crucigrama: se proporciona el crucigrama de acuerdo al número de preguntas lanzadas, debe haber un espacio para cada letra de las respuestas.
- Radio novela: es una actividad en el cual se elabora un escrito o guion sobre un tema y se escenifica como un programa de radio.
- El noticiero histórico: se necesita de un periodista y personas que escenifican los hechos.

### **3. Estado del arte**

Los sistemas operativos para dispositivos móviles ofrecen aplicaciones educativas, sin embargo, para el área de historia de México el número de aplicaciones es escaso. En este caso las Apps de Android son de interés puesto que muchas son gratuitas y el desarrollo de una nueva se puede realizar con software libre.

En el mundo, el smartphone es el dispositivo más utilizado para acceder a Internet y comunicarse. Informes del 2014 aseguran que más del 70% de los internautas lo usan y Android es el sistema operativo que domina este mercado, con 3 de cada 4 personas, pero bajando ligeramente frente al año 2013. Le sigue de lejos Apple (tabla 1), que sin embargo ganó cuota de mercado en 2014 alcanzando casi el 20% [4].

con amplia mayoría sobre su principal rival, Apple, señala un estudio de ComScore [1].

La firma de análisis de mercado detalla que en México el sistema operativo de Google abarca el 74.8% un nivel muy lejano del 12% que ostenta el iOS de Apple. El sistema de Microsoft, Windows Phone, mantiene el 5.6% del mercado dispositivos móviles que engloba teléfonos inteligentes y tabletas.

Tabla 1 Cuota de penetración de los sistemas operativos en smartphone en el mundo.

	2011	2012	2013	2014
Android	52.8%	70.4%	78.2%	76.6%
iOS	23.0%	20.9%	17.5%	19.7%
Windows Phone	1.5%	2.6%	3.0%	2.8%
BlackBerry	8.1%	3.2%	0.6%	0.4%
Otros	14.6%	2.9%	0.8%	0.5%

En México y en América Latina, Android domina el mercado de los smartphones

### Aplicaciones de Android

Al navegar por Google Play [10] donde Android ofrece sus aplicaciones para instalar, se encontraron dos aplicaciones relacionadas con el área de historia. Una de ellas es Historia de México (figura 1), ésta es una aplicación que muestra contenido de historia de México sobre los sucesos ocurridos durante la independencia de México. La información se muestra por medio de imágenes ordenadas de manera cronológica y al seleccionar una imagen se muestra información de hechos relacionados con la misma, mientras el usuario puede leer o escuchar la redacción.



Figura 1 Aplicación Historia de México

En cada sección de las imágenes de la aplicación Historia de México, se pueden escribir notas sobre el tema, a manera de resumen. Además la aplicación tiene una sección de evaluación donde muestra preguntas y repuestas de opción



múltiple. Las deficiencias de esta App son: las respuestas de las preguntas pueden modificarse en cualquier momento, no agrega puntaje o calificación al finalizar la evaluación y no emite mensajes de retroalimentación sobre el resultado de la evaluación.

¿Cuánto sabes de historia? (figura 2) es otra aplicación que ofrece Android, ésta muestra una serie de preguntas con respuesta de opción múltiple, al final da a conocer el número de aciertos correctos e incorrectos, además genera un mensaje como retroalimentación de acuerdo al desempeño de la prueba. El inconveniente de esta aplicación para los propósitos de esta investigación es el contenido, ya que es de historia universal y no de historia de México.

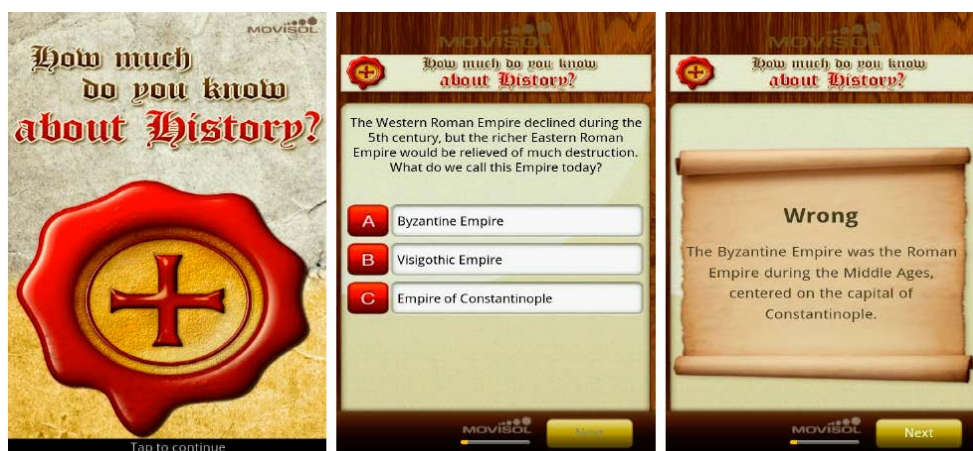


Figura 2 Aplicación ¿Cuánto sabes de Historia?

### Sitios Web

En la revisión del estado del arte también se encuentran algunos sitios Web relacionados con la asignatura de historia, e. g., <http://www.claseshistoria.com> (figura 3), en la que se presenta una revista digital de historia y ciencias sociales, el contenido que se encuentra en esta revista es sobre historia universal; <http://www.historiacultural.com>, es un sitio Web de historia universal, que da a conocer contenido de la prehistoria, edad antigua, edad moderna y edad contemporánea de México; y <http://www.juegos.com>, que es un sitio que ofrece juegos para evaluar conocimientos en historia.



Figura 3 Página Web [www.claseshistoria.com](http://www.claseshistoria.com)

### Otras aplicaciones

Existe otra aplicación para PDA llamada Edumóvil [11], la cual integra juegos para diversas materias de nivel primaria tales como matemáticas, español, ciencias naturales e historia de México. Para la asignatura de historia solo muestra líneas de tiempo por medio de Bluetooth que permite la comunicación entre los dispositivos y permite un aprendizaje de entorno colaborativo. Las líneas de tiempo se encuentran alojadas en un servidor.

### Comparativa de sistemas

Por lo tanto la aplicación que se plantea en este artículo es diferente a las establecidas en la tabla 1, puesto que, la aplicación que se pretende desarrollar ofrecerá juegos y videos interactivos adaptados al grado y edad de los niños de nivel primaria, además permitirá a los usuarios evaluar el desempeño del jugador



al responder una evaluación respecto al tema relacionado con la materia de historia de México.

En la tabla 2, podemos observar que las aplicaciones Historia y ¿Cuánto sabes de Historia? Están desarrolladas en Android, mientras que Edumóvil está desarrollada para PDA, así también se tienen 3 sitios Web. En cuanto a si necesitan o no de una conexión a Internet se puede observar que las tres primeras aplicaciones, i. e., Historia, ¿Cuánto sabes de Historia? Y Edumóvil no requieren de una conexión mientras que los sitios Web si la requiere. Únicamente la aplicación Edumóvil se encontró que es colaborativa, y dos aplicaciones (Historia y ¿Cuánto sabes de Historia?) presentan una evaluación a los usuarios para comprobar lo aprendido.

Tabla 2 Comparación entre los sistemas analizados.

Nombre o URL	Tipo App	Conexión a Internet	Colaborativo	Evaluación
Historia	Android	No	No	Sí
¿Cuánto sabes de historia?	Android	No	No	Sí
Edumóvil	PDA	No	Sí	No
<a href="http://www.claseshistoria.com">http://www.claseshistoria.com</a>	Sitio Web	Sí	No	No
<a href="http://www.historiacultural.com">http://www.historiacultural.com</a>	Sitio Web	Sí	No	No
<a href="http://www.juegos.com">http://www.juegos.com</a>	Sitio Web	Sí	No	No

#### 4. Diseño de la aplicación

Para el desarrollo de la aplicación, es necesario definir los requerimientos que se necesitan para el buen diseño de ésta y evitar que existan cambios de mucho impacto durante el desarrollo [8]. A continuación se lista los requerimientos previos.

##### Requerimientos de la aplicación

Es importante mencionar que conforme se avance en el desarrollo de la aplicación, se pueden agregar requerimientos siempre y cuando no se cambie el contexto de la aplicación y se respete el alcance de la misma:

- La aplicación debe ser desarrollada para dispositivos Android Smartphone y Tablet.
- La aplicación tiene que ser adaptada a niños de cuarto a sexto grado de primaria y el contenido debe ser sobre temas de historia de México.
- Implementar un módulo de evaluación para que el profesor y el usuario puedan ver el desempeño del alumno.
- En el cambio de nivel debe dar una especie de premios o darle ciertas "vidas" al juego para que el niño se interese por desbloquear el siguiente nivel.
- Dejar abierta la posibilidad de que la aplicación posteriormente se adapte en un entorno colaborativo.
- Se recomienda al inicio del juego mostrar la información del tema mediante un video animado o alguna forma que se considere interactiva.
- El máximo de niveles del juego se determinará de acuerdo a la cantidad de contenido del tema.
- Los colores de la interfaz deben ser atractivos para despertar el interés de los niños.
- Crear una base de datos para almacenar la información de la aplicación en el dispositivo móvil.

### **Diseño centrado en el usuario**

El objetivo del diseño centrado en el usuario es proporcionar el diseño de las interfaces de la aplicación [5], este modelo ayuda a crear un software tomando en cuenta principalmente al usuario. A continuación se describe el diseño preliminar de las interfaces de la aplicación de éste proyecto de desarrollo.

En la figura 4 ref. #1, es la primera interfaz que se muestra para que el usuario pueda seleccionar el nivel que desea jugar. La figura 4 ref. #2, pide al usuario configurar su entorno de juego, como resultado de seleccionar el botón configuración se despliega la interfaz de la figura 4 ref. #3. Después que el usuario configura su entorno muestra un video donde en la pantalla de la figura 4

ref. #4 y #5 muestra un mensaje como bienvenida y después el nombre del tema del video.

Cuando el usuario termina de ver el video, inicia la parte de evaluación que consiste en una serie de actividades donde se da un puntaje dependiendo de las repuestas correctas. En la figura 4 ref. #6 se muestra un mapa de la república mexicana con la finalidad de que el niño pueda colorear con tres colores diferentes áreas culturales de México (Aridoamérica, Oasisamérica, Mesoamérica).

Lo interesante de esta actividad es que el niño tendrá determinado tiempo para ubicar las áreas culturales. En caso de no contestar a tiempo se disminuyen el puntaje (vidas) mientras la barra disminuye conforme pierde. Cuando el alumno no logra concluir la actividad muestra nuevamente el mapa y evita pasar a la siguiente actividad. La finalidad de que el niño no pueda saltarse de actividades es que va a permitir emitir una calificación acertada a la actividad y al final se podrá determinar si realmente el alumno adquirió conocimiento o no del tema.

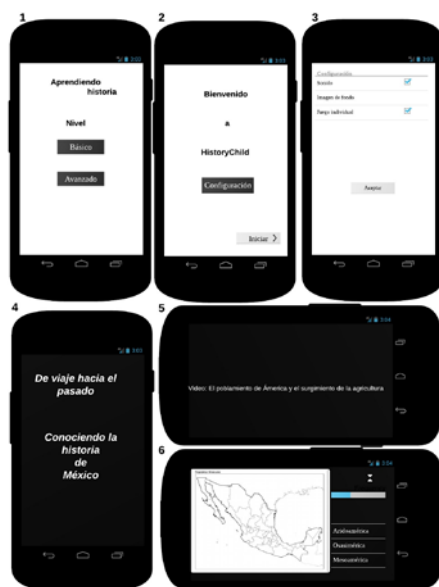


Figura 4 Diseño de interfaces.

En la figura 5 se muestra un crucigrama donde el alumno tiene que seleccionar cada una de las cuadrículas para que pueda leer la pregunta y contestarla. Las instrucciones de esta actividad son: por cada respuesta incorrecta se disminuyen

puntos, por preguntas contestadas correctamente se agregan puntos. Si logra terminar correctamente sin ningún error, el alumno recibe una insignia que puede usar en los siguientes niveles para salvar su juego en caso de perder todos sus puntos.

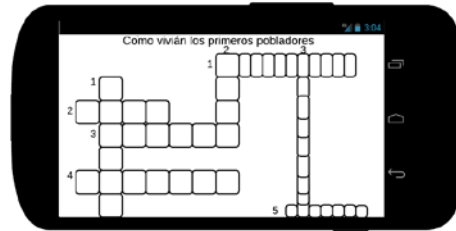


Figura 5 Crucigrama.

Para finalizar el nivel se muestra el juego de la lotería que se muestra en la figura 6, donde se muestran imágenes correspondientes al tema de los primeros pobladores, también se muestra una imagen con una pregunta aleatoria para que el alumno la relacione y seleccione correctamente. Cuando el alumno seleccione todas las imágenes del tablero se evalúa que estén bien contestadas y posteriormente pasa al siguiente nivel del juego.

Cuando responda bien a todas las preguntas, se evaluará el nivel y se asignará una calificación final de nivel, posteriormente se desbloquea el nivel dos.

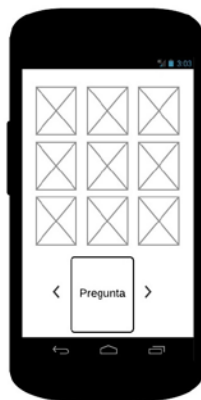


Figura 6 Lotería.

Cabe mencionar que este diseño deberá enriquecerse con la colaboración de los usuarios (alumnos y profesores) buscando con ello, un adecuado uso de colores, que sea atractivo y divertido.

## **Escenario de uso**

El escenario de la aplicación muestra la forma en como el usuario usará la aplicación y como ésta interactuará con la base de datos para el manejo de la información. A continuación en la figura 7 se muestra el escenario de uso. En el recuadro:

- 1) El usuario decide tomar el teléfono y abrir la aplicación, como cualquier APP de Android.
- 2) El alumno tiene que elegir uno de tres niveles que ofrece la aplicación, los cuales son: Básico, Medio y Avanzado. En el nivel básico se incorpora contenido del libro de texto Historia de cuarto grado de nivel primaria. El nivel medio se incluye contenido de historia de quinto grado de primaria. En el nivel avanzado contiene contenido de sexto grado. Dentro de los niveles se encontraran niveles de los juegos o actividades.
- 3) Después de que el alumno elige el nivel empieza a interactuar con la aplicación realizando cada una de las actividades que se ofrece.
- 4) El usuario puede finalizar un nivel (contempla una unidad del libro de texto correspondiente al grado de estudio), posteriormente se evalúa su desempeño.
- 5) El alumno puede subir de nivel o bien.
- 6) Guardar el estado de su juego. Aquí el niño tiene dos opciones.
- 7) Incorporarse nuevamente al juego antes de salir de la aplicación
- 8) O salir de la aplicación y regresar a 1) para volver a ingresar y reincorporarse al juego.

## **5. Conclusiones y trabajo a futuro**

En este artículo se presenta que el uso de las tecnologías, en particular de los dispositivos móviles puede ser de gran utilidad para la enseñanza, aprendizaje y evaluación de materias como Matemáticas, Geografía e Historia.

Actualmente en el mercado de aplicaciones móviles no se ha encontrado alguna que se enfoque exclusivamente en la historia de México (Sin conexión a Internet, que permita evaluación, etc). Una de las ventajas de la propuesta presentada en

este trabajo comparada con otras alternativas es que será exclusiva para la asignatura de Historia de México, no será necesario el uso de una conexión a Internet y podrá elegirse el nivel a revisar y evaluar.

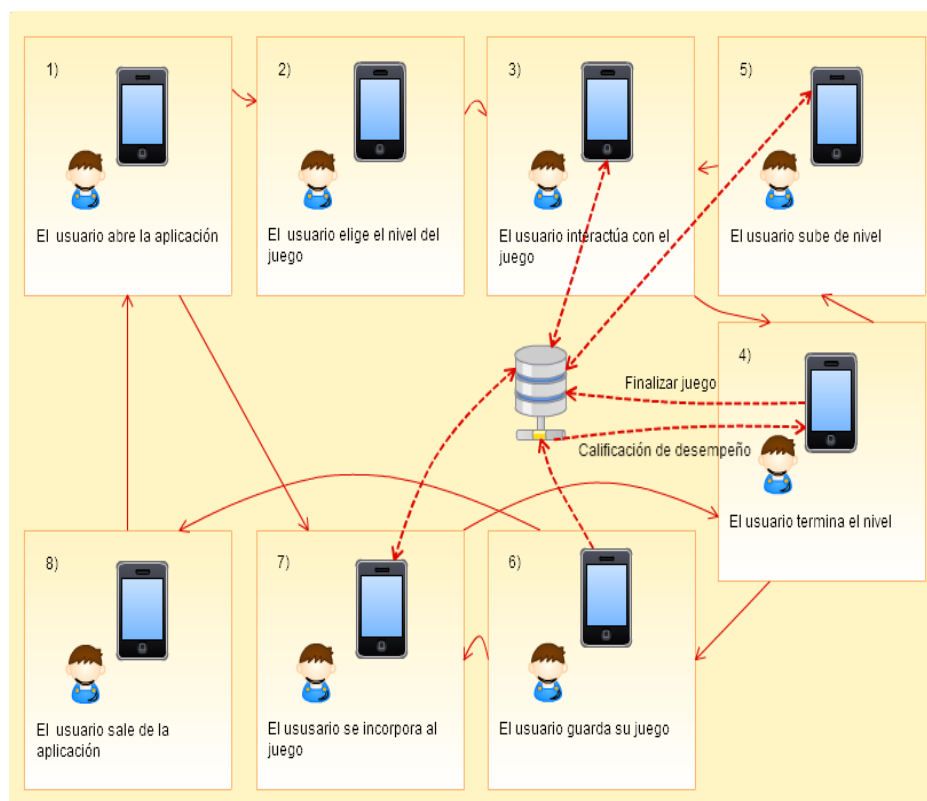


Figura 7 Escenario de uso.

Un punto importante a su favor es que sea interactivo para atraer su uso por parte de los alumnos. Del mismo modo se buscará que su desarrollo sea usando software open source para evitar gastos y permitir su uso de manera gratuita. En este artículo se presenta únicamente una propuesta de diseño, por lo tanto como trabajo futuro se pretende implementar y evaluar la aplicación.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Precisely Everywhere - comScore, Inc. <http://www.comscore.com/>. Agosto de 2016.

- [2] V. Cantillo, R. Roura, y P. Sánchez. "Tendencias actuales en el uso de dispositivos móviles en educación". *La educación digital magazine*. Vol. 1. N. 147. 2012. Pp. 1-21.
- [3] E. A. Coronado Cabrera, B. M. Briceño Briceño, Y. E. Ramírez Rivera, L. C. La Cruz Lugo, Y. J. Villamizar Villamizar, "Guías web basadas en hipermapas, una alternativa en la enseñanza local de la Geografía, Historia y Ciencias de la Tierra". *Educere*, Vol. 18. No. 60. 2014. Pp. 249-256.
- [4] Informe Ditrendia: Mobile en España y en el Mundo 2015 <http://www.Ditrendia.es/wp-content/uploads/2015/07/Ditrendia-Informe-Mobile-en-Espa%C3%B1a-y-en-el-Mundo-2015.pdf>. Junio 2015.
- [5] Diseño centrado en el usuario. <http://www.etnassoft.com/biblioteca/dise%C3%B1o-centrado-en-el-usuario/>. junio de 2015.
- [6] Tecnología educativa en la educación básica: el uso de enciclomedia en la primaria Octavio Paz. Odiseo. <http://www.odiseo.com.mx/2010/8-15/jimenez-enciclomedia.html>. Abril 2015.
- [7] J. Prats, J. Santanaca, M. Lima, Enseñanza y aprendizaje de la historia en la educación básica. Primera edición. 2011. SEP, UPN. México.
- [8] S. Pressman, Ingeniería del software un enfoque práctico. Séptima edición. 2010. McGrawHill. México.
- [9] F. Toledo, Educación, ciencia y sociedad. Primera edición. 2010. México: Palabras mínimas.
- [10] Google Play. <https://play.google.com/store?hl=es>. Mayo 2016.
- [11] El Proyecto Edumóvil: Consideraciones Iniciales <http://mixteco.utm.mx/~resdi/historial/Edumovil.pdf>. Mayo de 2016.

## **7. Autores**

Paula García Lucas es Licenciada en Informática por la Universidad de la Sierra Sur.

Víctor Alberto Gómez Pérez es Doctor en Sistemas Computacionales, integrante del cuerpo académico de Control Automático y Cómputo Ubicuo, actualmente es

profesor investigador en la Universidad de la Sierra Sur adscrito al Instituto de Informática.

Arturo Benítez Hernández es Doctor en Sistemas Computacionales, integrante del cuerpo académico de Tecnologías e Ingeniería de Software, actualmente es profesor investigador en la Universidad de la Sierra Sur adscrito al Instituto de Informática.

Jesús Cruz Ahuactzi es Doctor en Sistemas Computacionales, integrante del cuerpo académico de Tecnologías e Ingeniería de Software, actualmente es profesor investigador en la Universidad de la Sierra Sur adscrito al Instituto de Informática.



# **DISEÑO DE UN OBJETO DE APRENDIZAJE DIGITAL INTERACTIVO PARA FOMENTAR LA EMPATÍA EN ESTUDIANTES DE PRIMARIA**

***María del Carmen Hernández Castelán***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*marykarmenhc@gmail.com*

***Karen Ortega Ramírez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*karenkor7@gmail.com*

***Paulo Portilla Tirado***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*pauloportilla00@gmail.com*

***Erick López Ornelas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*elopez@correo.cua.uam.mx*

***María González De Cossío Rosenzweig***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*mdecosio@correo.cua.uam.mx*

***Felipe Victoriano Serrano***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa  
*fvictoriano@correo.cua.uam.mx*

## **Resumen**

El presente artículo tiene como objetivo la propuesta de diseño de un Objeto de Aprendizaje Digital Interactivo (ODAI) para fomentar la empatía en estudiantes de quinto de primaria y así mejorar su formación cívica y ética. Como parte de esta investigación se realizó un análisis documental, una observación cualitativa, así

como entrevistas no estructuradas para la identificación y análisis de la problemática. De esta forma, se diseñó un Objeto de Aprendizaje Digital Interactivo (OADI) como propuesta para mejorar la interacción social entre los estudiantes.

**Palabras Clave:** Empatía, formación cívica y ética, interactividad, investigación cualitativa, objeto de aprendizaje digital interactivo.

## 1. Introducción

En los últimos tiempos el crecimiento de las posibilidades de las computadoras y dispositivos electrónicos está convirtiéndose en un fenómeno social. Es habitual encontrar una gran cantidad de aplicaciones y programas de cómputo que facilitan el trabajo en todos los ámbitos.

Desde el punto de vista de la educación, las aplicaciones generadas y los recursos que podemos encontrar en línea también son muy notables. La posibilidad de acceder a una determinada información (por ejemplo, un curso o un programa educativo), o de difundir cualquier tipo de contenidos (ya sean éstos textuales, gráficos o sonoros), y la posibilidad de acceder a todo ello desde cualquier lugar conectado a la red y en cualquier momento, además de traspasar las habituales limitaciones en el número de estudiantes que pueden seguir un determinado curso, está propiciando ya aplicaciones muy variadas. La capacidad de intercomunicar alumnos de distintos centros educativos clásicos (presenciales), y las posibilidades que la red ofrece de acceder a material instruccional de primera mano facilitan la realización activa de tareas de aprendizaje por parte de los alumnos.

Por otro lado la necesidad de desarrollar habilidades para prevenir la violencia y mejorar la convivencia escolar ha llevado a las instituciones educativas a implementar programas a nivel nacional e internacional.

Actualmente en México se desarrollan programas piloto como el “Proyecto a favor de la convivencia escolar” (PACE) implementado en la educación primaria desde 2015, además de los contenidos actitudinales que se abordan en la currícula de Formación Cívica y Ética (FCyE). En el caso de esta materia se tienen como

apoyo, el Libro de Texto Gratuito (LTG) así como contenidos digitales. A partir de esto surgió el interés por indagar cómo los recursos tecnológicos están siendo utilizados para este tipo de contenidos en las escuelas primarias públicas en México.

En este estudio nos enfocamos en niños de nivel básico, específicamente 5o año de primaria. Partimos de la idea de que las formas de interactividad que surgen entre los niños de esta edad, pueden ser mediadas por un agente computacional o análogo, un educador, un familiar o entre pares, posibilita la generación de conocimiento [1]: son formas de aprendizaje que no se llevan a cabo necesariamente en el aula, y pueden presentarse en entornos como el hogar o el parque donde los niños socializan.

Por medio de la información obtenida dentro de un primer proceso de observación cualitativa así como de entrevistas a niños, profesores y la directora del plantel, identificamos una insuficiencia de materiales educativos digitales para fortalecer los contenidos de la materia de Formación Cívica y Ética, así como la dificultad por parte de los profesores para integrar los ya existentes, a las clases.

El objetivo es, entonces, proponer un Objeto de Aprendizaje Digital Interactivo (OADI) adaptado a las necesidades de estos estudiantes y que fomente la habilidad de empatía entre ellos.

De acuerdo a lo anterior, la segunda sección de este artículo presenta los conceptos centrales sobre los cuales se cimienta la investigación, relacionando el término de Objeto de Aprendizaje Digital Interactivo (OADI) con el tema de la empatía.

En la sección 3 se describe de manera breve el método empleado; en la sección 4 se presentan los hallazgos más relevantes derivados de la observación cualitativa y cómo estos se consideraron para la definición de perfil de usuario, así como para la propuesta de diseño del OADI. En el apartado 5 mostramos el modelo de empatía aplicado para el diseño de este objeto didáctico, mientras que en la sección 6 se presenta el diseño del OADI. Por último se expone una discusión sobre la aplicación de una tecnología digital para abordar contenidos de carácter actitudinal en la sección 7, así como las respectivas conclusiones en la sección 8.

## 2. La interactividad en los Objetos de Aprendizaje Digitales y la empatía

Desde el ámbito instruccional el término de Objeto de Aprendizaje (OA) propone una serie de características que han de cumplir los materiales de índole educativa, definiéndose como:

*La mínima estructura independiente que contiene un objetivo, un contenido, una actividad de aprendizaje, un metadato y un mecanismo de evaluación, el cual puede ser desarrollado con tecnologías de infocomunicación (TIC) de manera de posibilitar su reutilización, interoperabilidad, accesibilidad y duración en el tiempo [2].*

Enfocándose en los OA digitales, específicamente en aquellos que proponen al estudiante como sujeto activo en la construcción de conocimiento, esto es, aquellos que proponen la interactividad, se emplea el término Objeto de Aprendizaje Digital Interactivo (OADI) para realizar una propuesta de diseño.

Un elemento clave a lo largo del diseño y desarrollo de dichos objetos, es la participación libre del usuario en la aplicación. Es decir, el grado de libertad del usuario en relación con qué hacer y cómo hacerlo, así como la capacidad de respuesta del objeto en relación con el usuario. Es acá donde nos enfocamos en el concepto de la interactividad, entendiéndola como la “capacidad de diálogo entre usuarios y computadoras”, lo cual nos indica una relación bidireccional entre el sujeto y la máquina [3].

Un OADI considerado como “cualquier recurso digital que se puede utilizar como apoyo para el aprendizaje” [4], tiene como características más importantes el ser independientes y accesibles a través de metadatos, con la finalidad de ser reutilizados en diferentes contextos y plataformas educativas, además de las siguientes:

- *Accesibilidad.* Permite que un usuario pueda acceder el contenido fácilmente.
- *Reusabilidad.* Permite que el contenido pueda ser agrupado, desagrupado y reutilizado de forma rápida y sencilla. Que los objetos puedan ensamblarse.

- *Gestionabilidad*. Permite que el sistema pueda obtener y trazar la información adecuada sobre el usuario y el contenido.
- *Escalabilidad*. Permite que las tecnologías puedan configurarse para aumentar la funcionalidad [5].

Actualmente constituyen una herramienta práctica para apoyar al docente y a los estudiantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje; pueden ser reutilizados digitalmente en diferentes aplicaciones las veces que sea necesario, lo cual los hace accesibles a muchas personas de manera simultánea.

Por otro lado, el concepto de empatía, es abordado desde la Formación Cívica y Ética, asignatura que refiere a contenidos de tipo actitudinal. La SEP, en del plan de estudios vigente de educación primaria [6], considera relevante la idea de la empatía para favorecer competencias sociales y la define como “una disposición a considerar a los otros en cuanto a sus ideas y sus emociones presentes durante el diálogo, en la toma de decisiones, la reflexión, la participación y la convivencia en general. Es un elemento actitudinal fundamental de la comprensión mutua, que es necesaria en la construcción del trabajo colaborativo y de la concordia en las relaciones interpersonales”.

Si bien las formas de convivencia tienen como fuente de formación el hogar, las escuelas forman un papel fundamental en la socialización de los sujetos de la misma edad: constituye uno de los escenarios en los que se ponen en juego los valores, las ideas y las formas de convivencia de casa, mismas que son susceptibles de transformación.

Algunas investigaciones señalan la actitud positiva hacia la autoridad y el desarrollo de la empatía como factores de prevención y protección frente a la conducta violenta en el aula [7, 8, 9]. Entre sus beneficios destaca que la empatía juega un rol para la conducta pro-social y tiene una función en los niños que les permiten mayor entendimiento, compasión y regulación de la agresión. Es un proceso al que se le atribuyen todas estas funciones importantes para el desarrollo educativo y el aprendizaje del niño con respecto a los otros, a la sociedad y el actuar moralmente [5].

Investigaciones realizadas en la infancia y adolescencia temprana manifiestan una conexión entre la capacidad de resolver conflictos constructivamente y la empatía, factor determinante en el proceso en el que el individuo desarrolla sus relaciones interpersonales.

### **3. Método**

Para abordar de manera exploratoria la presente investigación, se definieron dos fases importantes: el análisis cualitativo y el diseño de la OADI. A continuación hacemos una descripción de cada una de ellas.

#### **Fase 1: El análisis cualitativo**

Para iniciar el proceso de investigación se realizó una investigación documental del problema, donde se identificó el plan curricular del Libro de Texto Gratuito (LTG) y específicamente la sección correspondiente a la Formación Cívica y Ética en este grado, con el propósito de observar la relación con los contenidos cargados en la tableta, así como de los objetivos didácticos perseguidos, denominados “competencias a favorecer”.

Posteriormente se realizó una investigación de campo, donde se utilizó una observación cualitativa dentro de un contexto acotado para poder analizar y verificar la forma en que son empleados los materiales educativos, específicamente el Libro de Texto Gratuito y los contenidos los digitales. Esta observación sirvió se convirtió en nuestro caso de estudio, el cual fue representado por la escuela primaria federal “Vini Cubi” situada en Cuajimalpa, México. La escuela primaria “Vini Cubi”, turno vespertino, fue seleccionada por encontrarse dentro el programa “Escuela segura” el cual atiende preferentemente a planteles educativos ubicados en los polígonos focalizados que ha definido el Programa Nacional para la prevención Social de la Violencia y la Delincuencia, y por ser una de las primarias públicas que participan en el Programa de Inclusión y Alfabetización Digital.

La siguiente etapa fue hacer una *descripción de los materiales análogos y digitales* encontrados para la enseñanza de la Formación Cívica y Ética y cómo se utilizan

en la clase. Para los materiales análogos se tomó en cuenta el LTG, así como herramientas utilizadas por el profesor para mejorar su interacción. Para los materiales digitales se analizó la tableta electrónica, la cual fue entregada en el año 2015 y la cual cuenta con la plataforma institucional denominada aprendemx [10]; así como otras aplicaciones digitales producidas por el Consejo Nacional de Bio diversidad, y la Fonoteca Nacional. Finalmente, se realizaron un conjunto de cuestionarios de satisfacción, los cuales fueron aplicadas a los estudiantes, para poder tener una evaluación de los OADI implementados por la SEP.

## **Fase 2: Diseño del OADI**

En esta segunda fase, fue importante definir el *perfil del usuario* en el que nos enfocaríamos. Un perfil puede considerarse como una serie de características en los individuos que los definen y les dan identidad, en nuestro caso estudiantes de 5o de primaria de la escuela Vini Cubi.

Fue importante, posteriormente, elegir el concepto rector de nuestra investigación: la empatía como una de las habilidades que influyen en la resolución pacífica de conflictos.

Posteriormente se planteó la realización de un *prototipado rápido*, el cual se basa en la idea de “usar y tirar”, el cual propone la creación de prototipos que se ponen a disposición del usuario para identificar tanto los aspectos funcionales, como aquellos que deben corregirse o sustituirse para su mejora continua. Este proceso se realizó mediante *talleres de diseño participativo* con sesiones entre usuarios y diseñadores y poder evaluar las diferentes etapas del OADI y *refinar el prototipo final*.

La figura 1 muestra un esquema del método utilizado para la obtención del prototipo final.

## **4. Hallazgos del análisis cualitativo**

Con base en el proceso de observación, así como de entrevistas realizadas durante el mes de octubre del 2015 en los grupos “A” y “B” del quinto grado, turno vespertino de la Escuela Primaria Federal “Vini Cubi”, se mencionan algunos de

los aspectos sociales, académicos, así como de convivencia escolar más relevantes encontrados:

- De acuerdo a los profesores asignados a estos grupos, los niños tienen un nivel académico correspondiente al 3er. grado de primaria, comparados con el turno matutino de ese mismo plantel.
- Algunos niños se encuentran en contextos de consumo de drogas, violencia y/o abandono.
- Se han presentado situaciones de agresión física así y un caso de extorsión entre los niños.
- Asisten cinco niños diagnosticados cada uno con Asperger, autismo, hemiplejía, trastorno mixto y déficit de atención.
- Los niños dieron a conocer durante clases, algunas experiencias que han observado en su comunidad sobre drogadicción o violencia con animales.
- En cuanto a los consumos culturales, si bien la información es diferenciada en cuanto a género, encontramos casos de coincidencias como en el uso de consolas de videojuegos y redes sociales.



Figura 1 Método utilizado.

Además de estos problemas encontrados, también se buscó determinar algunas características de este perfil de estudiantes, por lo que se indaga con respecto a los materiales de enseñanza–aprendizaje utilizados, a sus consumos culturales y



al contexto en el que se encuentran inmersos. La figura 2 muestra una infografía que sintetiza las singularidades de este perfil de niños.

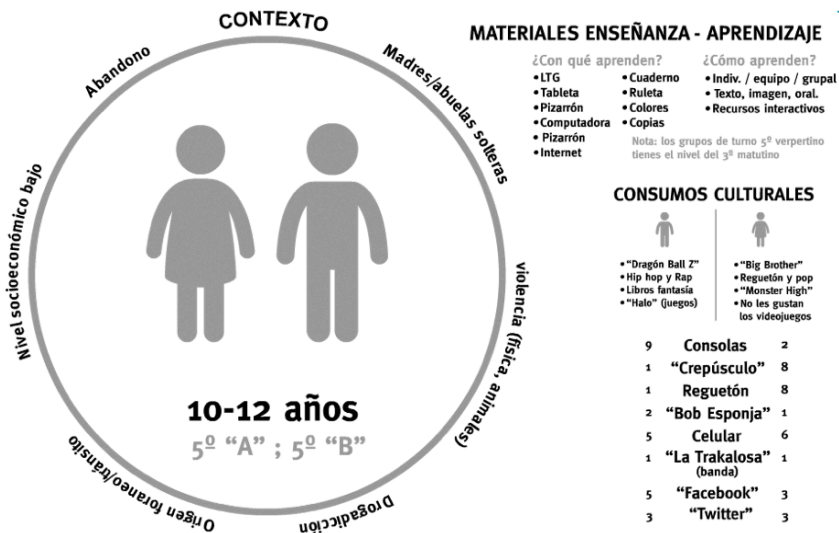


Figura 2 Perfil del estudiante de quinto grado.

## 5. Modelo de la empatía y su adaptación

En cuanto al diseño de un OADI en Formación Cívica y Ética, se eligió una de las lecciones del plan curricular de esta materia, optando por la lección no. 18 "Formas pacíficas de resolver conflictos", como una propuesta que contribuya al esfuerzo que se realiza institucionalmente para la prevención de la violencia y mejoramiento de la convivencia escolar. Se propuso abordar esta lección desde la empatía, ya que de acuerdo a la Secretaría de Educación Pública (SEP) se trata de un "Elemento actitudinal fundamental de la comprensión mutua, necesaria en la construcción del trabajo colaborativo y de la concordia en las relaciones interpersonales" [11].

Si bien la SEP establece este concepto de empatía, fue necesario la construcción de un concepto operativo que permitiera definir indicadores específicos para el diseño e implementación de un OADI, planteandola en adelante como la capacidad para distinguir y comprender los estados afectivos y cognitivos de los demás así como la habilidad para darles respuesta, diferenciando los estados

ajenos de los propios [7,12]. Esta definición permitió considerar a la empatía como actitud, una vez que, de acuerdo al modelo propuesto por Kamradt & Kamradt [13], se identificó que la actitud está integrada por tres componentes que trabajan indisolublemente (figura 3).

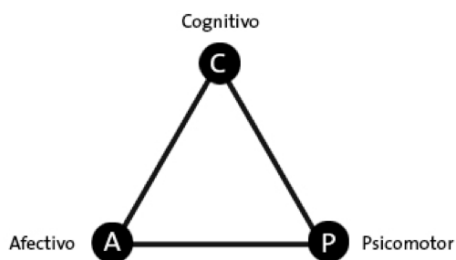


Figura 3 Modelo de la empatía como actitud.

Realizando las adaptaciones pertinentes a dicho modelo, se definieron indicadores en forma de verbos respectivos a cada componente para aplicarse en el desarrollo de un propuesta de diseño que aborde a la empatía como elemento actitudinal. Los indicadores presentados en la figura 4, fueron extraídos de diferentes pruebas psicológicas sobre empatía. Éstos son relevantes en tanto permiten definir los objetivos a perseguir por el OADI.

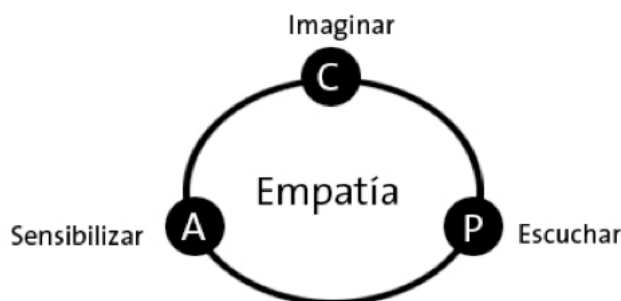


Figura 4 Adaptación al modelo de Kamradt & Kamradt.

## 6. Diseño del OADI para fomentar la empatía

De acuerdo a la figura 4 y con base en los aprendizajes esperados de la competencia “Manejo y resolución de conflictos”, así como de los indicadores del concepto de empatía propuesto, se define como objetivo didáctico para el OADI:

“Que el estudiante identifique emociones y las posibles acciones que éstas desencadenan, en una escalada de conflicto”.

Los elementos en los que nos basamos para realizar la propuesta de diseño del OADI son la narrativa y la interacción en primera persona. Mediante el planteamiento de la secuencia de acciones en el OADI: *evento-emoción-decisión-consecuencia*, se define la ruta que puede tomar la historia sugerida en el interactivo, proponiendo opciones al estudiante para que seleccione la que le parezca pertinente.

Lo anterior plantea un ejercicio en el cual el niño pueda identificar las consecuencias de sus decisiones de acuerdo a la emoción que le provocan algunas circunstancias de conflicto. Consideramos que a partir de este modelo el niño tiene posibilidad de practicar su habilidad para identificar sus emociones como requisito previo para identificar las emociones ajenas, promoviendo la habilidad de la empatía entre compañeros a partir de la aplicación de dos de los indicadores definidos en el modelo de empatía como actitud (sensibilizar e imaginar).

El OADI está diseñado para que el niño participe, ya sea de manera individual o grupal, con base a las emociones que experimenta a través de su rol en la historia (interacción en primera persona): sus respuestas se vinculan primeramente, con el componente afectivo de la empatía, que a la vez apela al componente cognitivo (cuando se presenta el andamiaje para que éste reflexione acerca de lo que su personaje está experimentando). En cuanto al componente psicomotor, el objetivo será que el niño recupere las habilidades y el andamiaje expuesto en el ejercicio realizado con el OADI para ponerlo a prueba en dinámicas propuestas por el profesor como parte de su planeación didáctica.

En la figura 5, se esquematiza el diseño general de la historia digital planteada a partir de la interacción en primera persona.

## **7. Discusión**

Uno de los cuestionamientos que se ha formulado a lo largo de esta investigación, ha sido respecto a la pertinencia y funcionalidad de una herramienta

digital para abordar un tema como el de la empatía. Al ser éste un tema de carácter actitudinal, pareciera que plantea implícitamente la condición de trabajarse a través de una relación cara a cara, (en este caso, entre niños y profesor) en la que se pone en juego la expresión corporal y en general, la presencia misma del sujeto, por tratarse de un concepto que apela a “la comprensión del otro”.

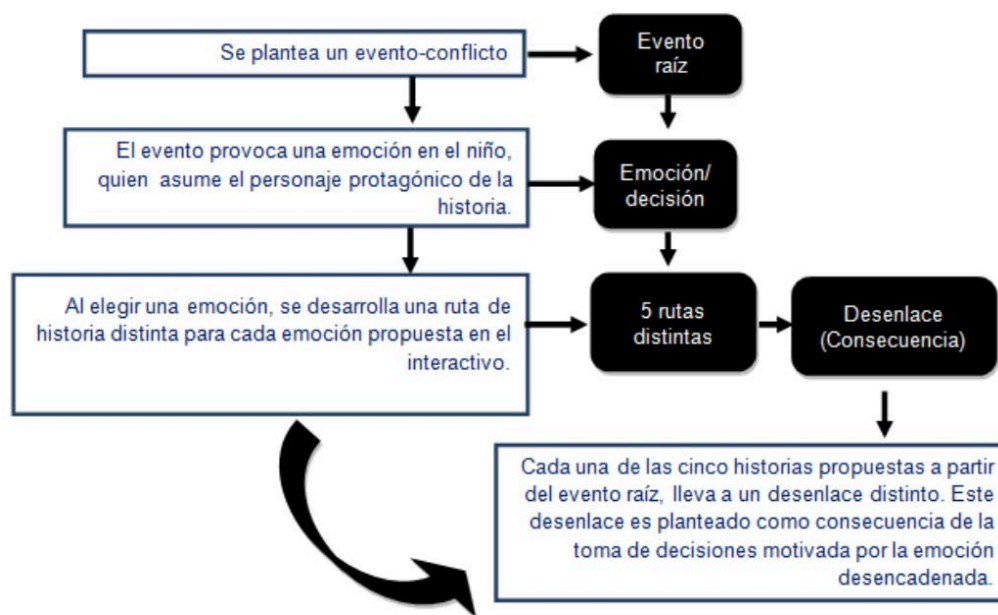


Figura 5 Diseño de la estructura general del OADI.

En nuestra propuesta de diseño de un OADI, se recupera de la dinámica de los videojuegos la interacción en primera persona, para presentar a los niños una situación de conflicto a manera de historia, en la que se busca la inmersión a partir de la participación de los niños requerida para decidir el curso de los acontecimientos, vinculando la emoción con la toma de decisiones.

Se trata por tanto, de una propuesta que explora las posibilidades del entorno digital para tratar contenidos actitudinales, mismos que pueden plantear en un primer momento cierta imposibilidad para ser trabajados con un dispositivo digital, por lo cual nos mantendremos atentos a los resultados que arroje la implementación de este OADI.

## **8. Conclusiones**

El caso de estudio representado por una escuela primaria pública de la Ciudad de México, nos permitió observar las dificultades en la incorporación de los dispositivos digitales móviles al trabajo en clase; respecto a los contenidos digitales e interactivos vinculados con las lecciones del plan curricular, específicamente los referentes a la materia de Formación Cívica y Ética, permiten identificar la distancia existente entre el concepto con base al cual se diseña institucionalmente y las necesidades específicas de niños y profesores. Este aspecto manifiesta la relevancia por establecer diálogo con los usuarios finales para los que se diseñan las propuestas, el cual que se reconoce fundamental en el enfoque del Diseño Centrado en el Usuario.

Vinculado a lo anterior, la definición precisa de los objetivos didácticos perseguidos, da pauta a la exploración de las características propias de los medios digitales que en conjunto con el proceso creativo, harían posible el desarrollo de propuestas innovadoras, adaptadas al contexto para el cual están pensadas.

Referente a los contenidos de índole actitudinal, la investigación respecto a las posibilidades que la empatía tiene para prevenir actos de violencia escolar, así como para desarrollar el comportamiento prosocial es un campo aún inexistente; si bien la Secretaría de Educación Pública propone a la empatía como un elemento actitudinal fundamental para la convivencia, en el quinto año de primaria no existen materiales de apoyo para su enseñanza.

Finalmente, a partir de la búsqueda de recursos digitales que apoyen el aprendizaje de contenidos actitudinales en el aula, se concluye que éste es un campo poco explorado al aprovechar mínimamente las propiedades de los entornos digitales, las cuales pueden ser funcionales para el diseño de este tipo de contenidos.

## **9. Bibliografía y Referencias**

- [1] E. Peñalosa, Estrategias docentes con tecnologías: Guía práctica. Primera ed. 2013. Pearson. México.

- [2] S. Maris, P. Pesado, Evaluación de la usabilidad de un Objeto de Aprendizaje por estudiantes. 2012.
- [3] T. Leinonen, E. Durall, "Pensamiento de diseño y aprendizaje colaborativo". *Revista Científica de Comunicación*. V. XXI. No. 42. Enero 2014. Pp. 107-116.
- [4] D. A. Wiley, Connecting learning objects to instructional design theory: A definition, a metaphor and a taxonomy. *The instructional use of learning objects: onli version*. 2011.
- [5] M. F. Fernández, La empatía desde dos miradas: la evolución y la educación. 2011. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba. Pp. 1-9.
- [6] Secretaría de Educación Pública. <http://www.curriculobasica.sep.gob.mx/images/PDF/planestudios11.pdf>. Septiembre 2016.
- [7] M. Garaigordobil, P. García De Galdeano, "Empatía en niños de 10 a 12 años". *Psicothema*. Vol. 18. No. 2. 2006. Pp.180-186.
- [8] D. M. Ruiz, E. E. López, S. M. Pérez, "Relación entre el clima familiar y el clima escolar: el rol de la empatía, la actitud hacia la autoridad y la conducta violenta en la adolescencia". *Psychology and Psycho-logical Therapy*. Vol. 9. No. 1. 2009. Pp. 123-136.
- [9] D. R. Johnson, "Transportation into a story increases empathy, prosocial behavior, and perceptual bias toward fearful expressions". *Personality and Individual Differences*. Vol. 52. Issue 2. January 2012. Pp. 150-155.
- [10] SEP, Habilidades Digitales para Todos. [http://www.sep.gob.mx/es/sep1/habilidades\\_digitales\\_para\\_todos#.Vv1m\\_GQrK2](http://www.sep.gob.mx/es/sep1/habilidades_digitales_para_todos#.Vv1m_GQrK2)
- [11] Secretaría de Educación Pública, Guía para el maestro. Formación Cívica y Ética 5°. <http://www.curriculobasica.sep.gob.mx/index.php/prog-primaria>. 2011.
- [12] J. Rifkin, La civilización empática: la carrera hacia una conciencia global en un mundo de crisis. 2010. Paidos Iberica. España.

- [13] Kamradt, E. J., & Kamradt, T. F. (2000). "Diseño educativo estructurado para la enseñanza de actitudes". *Diseño de la instrucción: teorías y modelos, un nuevo paradigma de la teoría de la instrucción*. Vol. 2. 2000.

## **10. Autores**

L.C.C María del Carmen Hernández Castelán, es estudiante de Maestría en Diseño, Comunicación en Información, en la línea de Estrategias de la Comunicación, de la Universidad Autónoma Metropolitana.

L.C Karen Ortega Ramírez es estudiante de Maestría en Diseño, Comunicación en Información, en la línea de Estrategias de la Comunicación, de la Universidad Autónoma Metropolitana.

L.D.C.V. Paulo Cesar Portilla Tirado es estudiante de Maestría en Diseño, Comunicación en Información, en la línea de Diseño de Información, de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Dr. Erick López-Ornelas es profesor-investigador en el Departamento de Tecnologías de la Información de la Universidad Autónoma Metropolitana – Cuajimalpa. Recibió su doctorado en Informática en la Universidad Paul Sabatier de Toulouse, Francia.

Dra. María González de Cossío Rosenzweig es profesora-investigadora en el Departamento de Teoría y Procesos del Diseño de la Universidad Autónoma Metropolitana – Cuajimalpa. Recibió su doctorado en Diseño de Información, en la Universidad de Reading, Inglaterra.

Dr. Felipe Victoriano Serrano es profesor-investigador en el Departamento de Ciencias de la Comunicación de la Universidad Autónoma Metropolitana – Cuajimalpa. Recibió su doctorado en Estudios Culturales y Literatura Latinoamericana en la Universidad de Tulane, Nueva Orleans, EUA.

# COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA LA ENSEÑANZA DE LA PROGRAMACIÓN

***Patricia Zavaleta Carrillo***

Universidad Autónoma del Carmen  
*pzavaleta@pampano.unacar.mx*

***Damaris Pérez Cruz***

Universidad Autónoma del Carmen  
*dperez@pampano.unacar.mx*

***J. Felipe Cocón Juárez***

Universidad Autónoma del Carmen  
*jcocon@pampano.unacar.mx*

***Elvia Elvira Morales Turrubiates***

Universidad Autónoma del Carmen  
*emorales@pampano.unacar.mx*

## **Resumen**

Este artículo presenta el resultado de una investigación sobre las diferentes herramientas, métodos y técnicas que se emplean en el proceso de enseñanza / aprendizaje de la programación. Incluye una descripción de los trabajos de investigación relacionados con el desarrollo y uso de herramientas, métodos y técnicas para la enseñanza de la programación en Universidades versus Facultad de Ciencias de la Información (FCI) de la Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), con el propósito de proponer aquellos que son aplicables en la enseñanza de la programación dentro de la Facultad.

**Palabra(s) Clave(s):** Aprendizaje, enseñanza, programación.



## 1. Introducción

En la programación de computadoras se requieren de varias competencias y habilidades relacionadas con la capacidad de manipular un conjunto de abstracciones interrelacionadas para resolver problemas [1], para enseñar a programar, se tiene primero que enseñar cómo solucionar problemas, especificar los pasos a seguir para la solución del problema y posteriormente se pueden utilizar las herramientas para escribir el algoritmo o programa. El método propuesto por George Polya [2] es una guía muy utilizada en la resolución de problemas, formada por cuatro pasos: 1) comprender el problema, 2) diseñar un plan de solución, 3) ejecutar el plan y 4) examinar la solución obtenida, lo que se puede corresponder con la metodología para el desarrollo de programas en sus fases básicas. En áreas relacionadas con la enseñanza en áreas computacionales se han hecho diferentes investigaciones de las cuales se derivan técnicas, metodologías y herramientas computacionales que buscan apoyar a los profesores y alumnos en la enseñanza y aprendizaje de la programación y áreas de la computación y desarrollo de sistemas [3, 4].

En la búsqueda de mejores resultados en la enseñanza de la programación, en la FCI se llevó a cabo una investigación para contextualizar la problemática de la enseñanza, analizando los métodos, las técnicas y las herramientas que facilitan el proceso de enseñanza aprendizaje de la programación. A continuación se listan los pasos seguidos en la investigación:

- a) Se realizó investigación exploratoria sobre publicaciones relacionadas con la difusión de investigación y experiencias en todo lo relacionado con la enseñanza de la programación.
- b) Se elaboró listado descriptivo de los diferentes métodos, técnicas y herramientas encontradas.
- c) Se compararon y clasificaron las herramientas computacionales, métodos o técnicas descritas en los artículos para considerar su aplicabilidad en los cursos de programación de la FCI.
- d) Se analizó la información concentrada en la investigación descrita en [25], y se elabora un cuestionario para identificar los métodos, técnicas y

herramientas que fueron usados en sus cursos de programación el cual es aplicado a los alumnos de la FCI. El instrumento se aplicó a 84 alumnos activos en la FCI durante el ciclo escolar Agosto-diciembre de 2012, dicha población consta de alumnos que pertenecen a las generaciones de cursos del modelo de aprendizaje basado en experiencias y los del modelo basado en competencias.

- e) Finalmente se compararon los métodos, técnicas y herramientas utilizados en la FCI contra los mencionados en los artículos seleccionados, para realizar una propuesta de diferentes métodos, técnicas y herramientas que pueden aplicarse en los diferentes cursos de la FCI.

## **2. La programación en Instituciones de Educación**

Para satisfacer el incremento en el uso de las computadoras a nivel Nacional e Internacional en todas las áreas laborales y profesionales, se han creado diferentes carreras que forman profesionistas en diferentes áreas de la computación, informática y desarrollo de sistemas computacionales. Estas carreras llevan como base al menos un curso de Programación y con ello la preocupación de cómo se debe impartir, lo que ha originado distintas investigaciones y propuestas relacionadas con la enseñanza de programación.

Relacionado con la enseñanza de programación a nivel básico, en Colombia, desarrollaron una herramienta llamada DFD, el cual es un editor e intérprete de algoritmos básicos representados en diagramas de flujo [5], pretendía introducir un método didáctico e interactivo para la enseñanza y el estudio del comportamiento de algoritmos.

En la Universidad de Stanford, se desarrolló MiniJava un lenguaje de programación para enseñar POO [6], es un subconjunto restringido de la versión estándar de java diseñado para reducir el factor intimidación en estudiantes cuando se encuentran con sistemas tan grandes como el medioambiente de java.

En la Universidad de Talca en Chile [7], proponen una metodología para aprender a programar, consiste en: comprender primero la arquitectura del computador, exponiendo sus características internas y estudiando la forma en que ejecuta los

programas. Los alumnos trabajan con el lenguaje ensamblador de un computador ficticio, que cuenta con un conjunto de instrucciones muy simple y limitado. Posteriormente, la mayor parte del curso se concentra en la programación en el lenguaje Java.

El proyecto IDEFIX [8] consiste en el desarrollo de una plataforma que facilite la enseñanza de la programación en diferentes lenguajes mediante la utilización de Internet. El sistema permite la realización de prácticas de laboratorio mediante la creación de un entorno dinámico de desarrollo. En este entorno, los estudiantes tienen acceso a los enunciados de los ejercicios de programación y los evalúa de forma automática.

En el Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación de la Universidad Nacional del Sur, se desarrolló un ambiente de aprendizaje con un editor interactivo de algoritmos, un constructor automático de trazas, y un traductor de programas en lenguaje *Pascal* [9]. Para minimizar las etapas que no aportan demasiado interés en lo que se refiere a la programación, específicamente la resolución del problema, al diseño y a la formulación del programa, el editor de algoritmos ayuda al alumno en la especificación del mismo y permite comprobar que esté correcto con la detección de errores mediante la confección automática de trazas. El editor cuenta con plantillas de las diferentes estructuras de control, datos de entrada, datos de salida, comprobación de tipos de datos; cuenta con un corrector sintáctico y semántico.

En la tesis [10], desarrollo un medioambiente de programación llamado *Storytelling Alice*, que da en nivel secundaria, una primera experiencia con programación de computadoras, con el propósito de presentar la programación como un significado con el fin de contar historias, como actividad de motivación, la herramienta incluye tres tipos de soportes, para habilitar a los usuarios para crear historias: el primero, animaciones de alto nivel que permiten el uso de personajes sociales que pueden interactuar con otros, segundo, una galería de personajes y elementos de escena que ayudan a encontrar historias, finalmente un tutorial basado en historia.

El Dr. Andrew Scott, profesor asistente de la Universidad de Western Carolina, desarrolló *Progranimate*, una herramienta en java disponible en línea, para la

enseñanza de programación visual orientada a programadores novatos. Su objetivo es hacer más fácil la asimilación de la programación en su etapa inicial, proporcionando un entorno amigable, fácil de usar y sin la complejidad de la escritura de la sintaxis de un lenguaje [11].

De igual modo, en la Universidad Politécnica del Estado de México, se desarrolló una herramienta sustentada en los cuatro grandes paradigmas de la programación (Paradigma Imperativo, Paradigma Funcional, Paradigma Basado en reglas, Paradigma Orientado a Objetos) partiendo de la hipótesis de “la reducción del tiempo en aprender a programar, está relacionada positivamente con el uso de la metodología de diseño de algoritmos y de una herramienta automatizada en un sistema de información”, [12].

Otro medioambiente que se desarrolló para enseñar programación a los niños es *Scratch* un entorno para enseñar conceptos básicos de programación, fue desarrollado en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachuset), permite comenzar a entender conceptos como ciclos, control de flujo, señales, etc. Este entorno es completamente gráfico. Los juegos que se construyen son animaciones a las que se les coloca comportamiento mediante programas, y los programas se construyen mediante elementos que se arrastran y pegan como piezas de LEGO. *Scratch* está construido sobre *Squeak*, que es un ambiente para desarrollo multimedia hecho en lenguaje Smalltalk [13]. Aunque fue creado para niños, es utilizado en algunas universidades como una herramienta para facilitar el aprendizaje de la programación.

Algunos investigadores [14], proponen en una primera aproximación, asociar niveles de la jerarquía de *Bloom* con herramientas de programación concretas. Basados en la tabla de niveles de experimentación y los niveles de conocimiento de *Bloom*, hicieron una clasificación de herramientas de programación adecuadas para cada nivel.

Con respecto a la enseñanza de la programación en el libro de Programación Estructurada [15], se propone enseñar Programación Estructurada antes que Programación Orientada a Objetos (POO) y la Visual, ya que la POO se basa en la programación estructurada y va más allá, la POO incluye los elementos básicos de

la estructurada como son los tipos de datos básicos, las estructuras de control, módulos y funciones. Además menciona que un error que se comete cuando se enseña a programar es: enseñar directamente sobre un lenguaje, lo que supone que el alumno tenga que aprender la lógica de programación y la sintaxis del lenguaje al mismo tiempo.

Martin Blom y otros [16], de la Universidad de Karlstad, proponen un método de programación basada en contratos para forzar los aspectos semánticos y lo experimentan en un curso, para ver las ventajas que tal método pueda tener sobre las habilidades del estudiante. Un aspecto importante cuando se enseña tecnología OO es la semántica de la programación, muchas veces es tradicional que se enseñe sobre sintaxis y mecanismos del lenguaje y cualquiera que sea la semántica se le da menos tiempo. Presentan el método y un experimento llevado a cabo en un curso sobre un trabajo de proyecto y java para comparar el método con un método de programación estándar. Los estudiantes recibieron el método positivamente quienes dijeron que trabajar con el método resulto muy natural.

El Simulador Gráfico Asistido por Computador Para la Enseñanza de Programación de Lenguajes Estructurados (SIGACLE), su principal objetivo es el desarrollo de habilidades cognitivas en estudiantes de pregrado en las materias de programación de computadores. El objetivo pedagógico es presentar al estudiante vistas diferentes de lo que sucede en la máquina al ejecutar un programa. El ambiente gráfico muestra el estado de la memoria y la forma en que las instrucciones del programa lo afectan, permite comprender las acciones internas que ocurren en el computador [17].

Chesñear del Departamento de Computación, de la Universidad Nacional del Sur en Argentina [1], propone los mapas conceptuales como una técnica didáctica que facilita a los alumnos una mayor comprensión y vinculación de conceptos relacionados con la elaboración de programas, añadiendo atributos visuales para facilitar la distinción de conceptos.

En la Universidad Autónoma de Aguascalientes implementaron una estrategia instruccional [18] basada en el modelo de Robert Gagne, en la que concretan el enfoque metodológico de la estrategia de diseño de solución en dos puntos

principales, el primero es un enfoque de estructuración del problema ó diseño de soluciones en la que sugieren la fijación de principio generales (objetivos y criterios) y segundo, la aplicación del paradigma práctica reflexiva, analizando y auto-reflexionando sobre los programas generados; para que de esta manera se afinen los “esquemas” generados.

En la Universidad del Istmo en Oaxaca, se implementó ABEA (Asistente Básico en la Enseñanza de Algoritmos), software educativo que busca ser un elemento auxiliar en la enseñanza en cursos de introducción a la programación, poniendo énfasis en la resolución de algoritmos, propiciando que el estudiante desarrolle su capacidad de abstracción de forma gradual y sin perderse en detalles de un lenguaje específico. El diseño de la herramienta sigue la heurística de resolución de problemas de Polya fomentando en el estudiante buenas prácticas de programación desde el análisis del problema hasta la prueba y verificación de la solución algorítmica [19].

Aparte de lo mencionado anteriormente, se han desarrollado varias herramientas computacionales que apoyan en la enseñanza de cursos afines al área de las ciencias computacionales. Villalobos y otros [20] describen un conjunto de herramientas computacionales que permiten a un estudiante experimentar con los conceptos introducidos en el curso de estructuras de datos. Otro ejemplo es un sistema tutorial interactivo de estructura de datos [21] que muestra mediante animaciones gráficas el comportamiento de las operaciones básicas sobre las estructuras de datos clásicas (listas, pilas, colas y árboles binarios).

En el Departamento de Sistemas Informáticos y Programación de la Universidad Complutense de Madrid desarrollaron una herramienta informática para la visualización interactiva de estructuras de datos y esquemas algorítmicos [22], en su herramienta pretenden mostrar la separación entre especificación e implementación de una estructura de datos y proporcionar ejemplos de utilización de dichas estructuras, la herramienta cuenta con los tipos de datos: pilas, colas, árboles binarios de búsqueda, árboles AVL, colas de prioridad, tablas ordenadas y tablas dispersas.

En el Departamento de Sistemas Computacionales de la Universidad Autónoma de Baja California Sur [23], presentan una herramienta didáctica que proporciona al alumno un entorno de programación en el cual puede diseñar algoritmos básicos para el manejo de listas ligadas en pseudocódigo, y comprobar su funcionamiento y desempeño de manera visual.

Para el curso de ingeniería de software, Alex Baker y otros [24] proponen un juego de cartas educacional, que liga la teoría y la práctica con los fenómenos que ocurren en los procesos de ingeniería de software del mundo real. Las cartas están diseñadas para enseñar aquellos procesos que no son suficientemente subrayados en las lecturas y proyectos. Simulan los procesos desde la especificación de requerimientos hasta el producto desarrollado. El juego incluye además, la competencia, cada jugador toma el papel de administrador de proyecto y deberá completar el proyecto antes que alguno de sus oponentes lo hagan, también se incluye aprendizaje colaborativo, el juego es físico (se juega con interacción cara a cara entre los jugadores).

En la Universidad Nacional de Colombia, proponen “El Juego de la Consistencia” [3], que trabaja el concepto de consistencia entre diagramas de UML (*Unified Modeling Language*), los diagramas que se usan en el Juego de la Consistencia son: diagramas de casos de uso, diagramas de clase, diagramas de secuencia. La consistencia pretende que los requisitos de una especificación no se contradigan entre sí. El objetivo del juego es llenar correctamente plantillas predefinidas de cuatro diagramas (esquema pre-conceptual, diagrama de clases, diagrama de casos de uso y diagrama de secuencias), que corresponden al modelo verbal de un problema específico.

En la tabla 1 se presentan las investigaciones descritas anteriormente, indicando de acuerdo a la literatura revisada, si es una herramienta, una metodología o una técnica.

### **3. La Programación en la FCI**

Para determinar los Métodos, técnicas y herramientas que se aplican en la enseñanza de la programación, se diseñó un cuestionario con preguntas aplicadas

en el aula a los alumnos de las carreras de Informática y Computación [25]. El resultado obtenido es el siguiente:

- El lenguaje de programación más usado en la mayoría de los cursos es el lenguaje C/C++ y su principal medioambiente de desarrollo es *borland*, después el lenguaje java y su medioambiente es *NetBeans*<sup>1</sup>.
- El lenguaje C es el que predomina en los cursos iniciales y el lenguaje java para los cursos de programación orientada a objetos y la programación visual.
- También mencionan el uso de herramientas para modelado UML como Dia. En cursos relacionados con ensamblador se utilizó en la mayoría PC-Spim y Emu8086.

Tabla 1 Clasificación de investigaciones de enseñanza de programación.

Herramienta	Técnica /Estrategia
Herramienta DFD [5]	Mapas conceptuales para enseñar programación [1]
MiniJava [6]	El juego de la consistencia [3]
Editor de algoritmos (genera código en pascal) [9]	Programación Estructurada. Un enfoque algorítmico [15].
Scratch [12]	Estrategia Instruccional [18]
Storytelling Alice [10]	Juego para enseñar I.S. [24]
Progranimate [11]	
Herramienta. Implementa 4 paradigmas de programación [12]	
Scratch [13]	
SIGACLE [17]	
ABEA [19]	<b>Método</b>
Laboratorio flexible de estructuras de datos [20]	Conocimiento de la arquitectura de computadoras [7]
Tutorial gráfico interactivo de estructuras de datos [21]	Proyecto IDEFIX [8]
Herramienta visualización interactiva de estructuras de datos [22]	Taxonomía de Bloom [14]
Herramienta didáctica para diseñar algoritmos básicos [23]	Metodología basada en contratos [16]

#### 4. Recomendaciones para la FCI

Con base a la investigación de las herramientas que son empleadas para enseñar programación, se listan en la tabla 2, métodos, técnicas y/o herramientas

<sup>1</sup> NetBeans <https://netbeans.org/>



que pueden ser útiles a los profesores, como apoyo en la enseñanza de los diferentes cursos de programación impartidos en las carreras de Ingeniería en Computación, Ingeniería en Sistemas Computacionales e Ingeniería en Diseño Multimedios de la FCI.

Tabla 2 Sugerencias para cursos de la FCI.

Sugerencia	Curso
Laboratorio flexible de estructuras de datos [20]	Estructuras de datos
Tutorial gráfico interactivo de estructuras de datos [21]	Estructuras de datos
Alice	Programación gráfica I
Scratch	Programación gráfica I
Herramienta DFD	Programación I
MiniJava	P.O.O.
ABEA	Programación I
Conocimiento de la arquitectura de computadoras [7]	Programación I

## 5. Descripción de 3 herramientas sugeridas FreeDFD 1.1.

Editor e intérprete de diagramas de flujo permite editar, ejecutar y depurar algoritmos representados como diagramas de flujo. Útil en la enseñanza de algoritmos básicos, también incluye recursividad, modularidad y arreglos de varias dimensiones que permiten construir algoritmos complejos. Es software libre y puede ser redistribuido y/o modificado bajo los términos de la Licencia Pública General de GNU publicada por la Free Software Foundation, en cualquiera de sus versiones. Sus diagramas de flujo siguen los estándares utilizando símbolos que se conectan por medio de flechas, para establecer la secuencia de una determinada operación o funcionalidad. Los algoritmos desarrollados pueden ser guardados y recuperados en disco y pueden ser impresos en diferentes tamaños. Con el uso de plantillas predeterminadas facilita la construcción de diagramas de flujo, se pueden agregar símbolos y flechas para establecer secuencias de instrucciones; proporciona una barra de herramientas en la que se pueden seleccionar los distintos elementos que se quieren ir agregando al modelo (figura 1). Soporta las estructuras de programación: "Asignación", "Ciclo mientras", "Ciclo para", "Decisión", "Lectura", "Llamada", "Salida" y "Nuevo Subprograma". También permite trabajar con expresiones complejas que involucren constantes, variables, funciones y operadores.

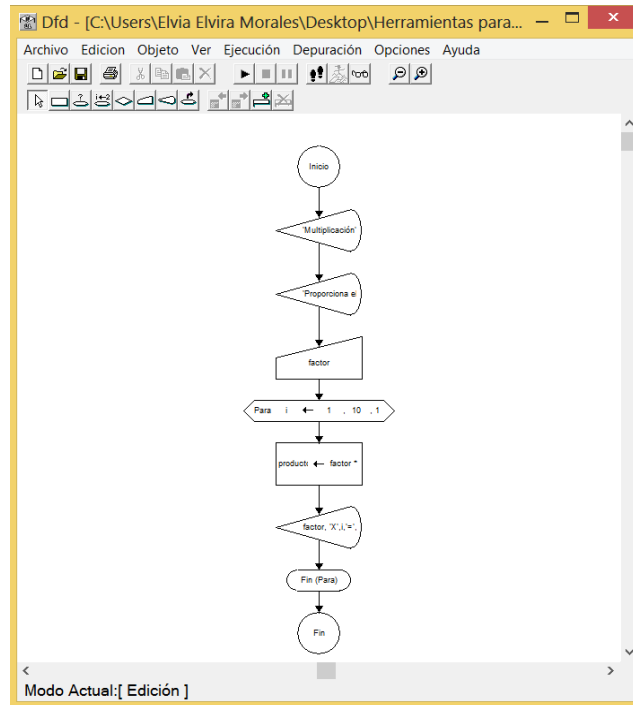


Figura 1 Algoritmo de ejemplo generado en Dfd.

Permite la utilización de arreglos de cualquier dimensión. Existen tres tipos de datos: Real, Cadena de Caracteres y Lógico; además 24 operadores y 19 funciones que operan con datos de estos tipos.

Permite un ambiente de programación estructurada con la utilización de subprogramas que permiten el paso de argumentos por referencia y por valor, con lo que se pueden elaborar y estudiar algoritmos que impliquen recursividad directa e indirecta o simples llamadas para modularizar los procesos [5]. Proporciona la opción de probar los algoritmos elaborados, con las opciones de: “Detener” que permite pausar la ejecución del diagrama de flujo, “Depuración de paso simple” que permite una depuración paso a paso, “Ejecutar hasta” permite puntos de ruptura en la ejecución del diseño del diagrama de flujo y “Evaluar” que funciona como una calculadora. Los errores generados en cualquier lugar del diagrama, son detectados y mostrados a través de mensajes, indicando el lugar en el que se presentan. El diagrama de flujo generado sirve como algoritmo que guía la elaboración del programa en la etapa de la codificación usando un lenguaje de programación estructurada.

## Progranimate 2

Es una herramienta en línea para la enseñanza de programación visual, orientada a programadores novatos, de uso libre, desarrollada en java por el Dr. Andrew Scott [11]. Su objetivo es hacer más fácil la asimilación de la programación en su etapa inicial, proporcionando un entorno amigable, fácil de usar y sin la complejidad de la escritura de la sintaxis de un lenguaje. El entorno (figura 2) permite realizar un diagrama de flujo, generar su código en lenguaje (*Java*, *VB.NET*, *VB6*, *Pascal* y *JavaScript*), corrida paso a paso y comportamiento de las variables durante la ejecución. En cuanto a programación, permite declarar variables simples y arreglos, realizar procesos, entrada y salida de datos, condicionales simples y dobles e iteraciones con ciclos *for* y *while*.

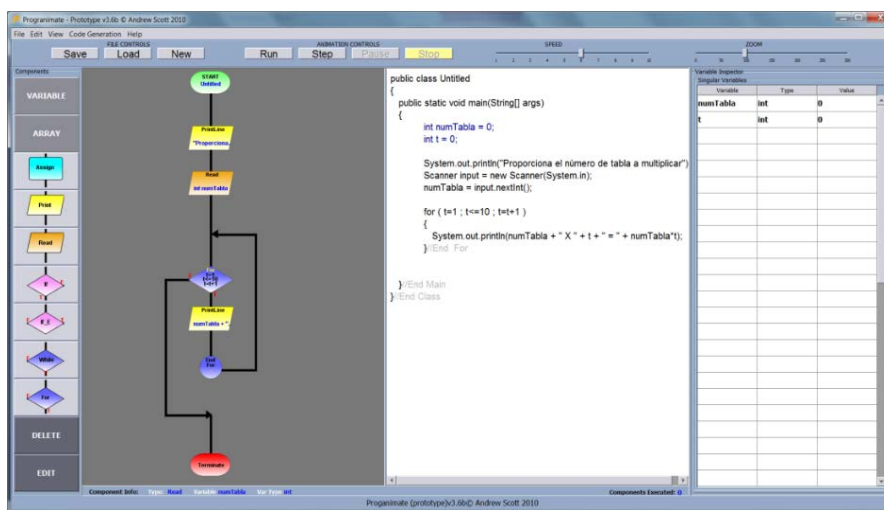


Figura 2 Algoritmo de ejemplo generado en *progranimate*.

## Scratch

Entorno de aprendizaje que facilita el aprendizaje autónomo de un lenguaje de programación. La gramática está basada en una colección de bloques de programación gráficos. El usuario los coloca juntos para crear programas, como con las piezas de *Lego*, conectores en los bloques indican cómo deben juntarse, el usuario puede comenzar por simplemente pensar con las piezas, colocándolas juntas en diferentes secuencias, hacer combinaciones y ver qué pasa.

<sup>2</sup> Página de ProgrAnimate disponible al 21 de Junio de 2016.

Los bloques de *Scratch* están conformados para encajar de manera que tengan sentido sintáctico. Las estructuras de control se basan en C. La forma de bloques de salida es acorde a los tipos de valores que devuelven: óvalos para números y hexágonos para Booleanos. Bloques condicionales (*if* y *repeat-until*) tienen forma hexagonal, indicando que un booleano es requerido.

*Scratch* es altamente interactivo mezclando gráficos, animaciones, fotos, música y sonido, solo hay que hacer clic sobre una pila de bloques y se empieza a ejecutar su código inmediatamente. La herramienta permite: a) hacer cambios a una pila que se está ejecutando, por lo que es fácil de experimentar con nuevas ideas de forma incremental e iterativa, y b) crear hilos paralelos, al crear múltiples pilas de bloques. El objetivo es hacer la ejecución en paralelo tan intuitiva como la ejecución secuencial y su interfaz es semejante a un escritorio físico (figura 3).

La mayoría de los lenguajes de programación (y los cursos de ciencias computacionales) privilegian la planeación de arriba hacia abajo, antes que la de abajo hacia arriba. El énfasis en el diseño iterativo e incremental se alinea con el estilo de desarrollo de *Scratch*.

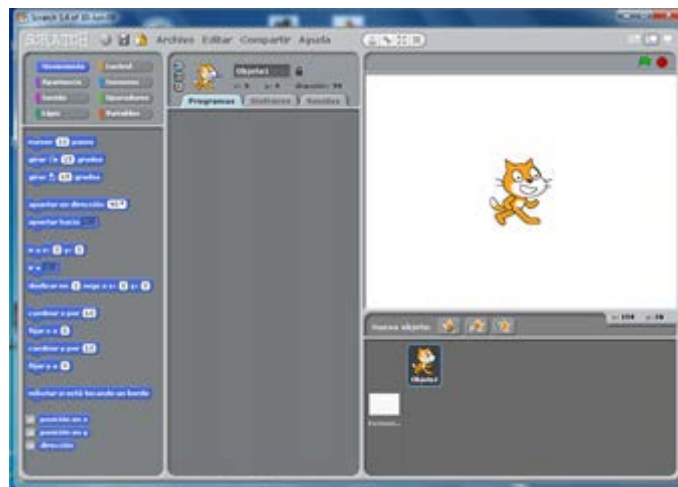


Figura 3 Ejemplo de programa en Scratch.

Antes de lanzar Scratch en 2007, se probó continuamente con prototipos en entornos del mundo real, revisando una y otra vez basado en la retroalimentación y sugerencias obtenidas de las pruebas.

## 7. Conclusiones

Existe la necesidad de mejorar la enseñanza/aprendizaje de la programación en las carreras relacionadas con la informática y ciencias computacionales, tanto a nivel nacional como internacional, en relación a esta necesidad se han realizado diversas investigaciones y propuestas de métodos, técnicas y/o herramientas que apoyan la enseñanza en cursos de programación.

El uso de algunas de estas herramientas de programación puede contribuir a elevar los índices de aprobación en los cursos de programación.

Por parte de las entidades correspondientes en cada una de las escuelas y universidades se tienen que revisar los perfiles de cada programa de estudio y en base a estos, proponer el tipo de paradigma y el lenguaje de programación que contribuyan al logro de los objetivos de dicho programa de estudio.

## 8. Bibliografía y Referencias

- [1] C.I. Chesñear, "Utilización de mapas conceptuales en la enseñanza de la programación". Lidecc, 2000.
- [2] G. Polya, *Cómo plantear y resolver problemas*. Reprint. 1965. Trillas. 1965.
- [3] C.M. Zapata, M.I. Duarte Herrera, "Consistency game: a didactic strategy for software engineering". *Rev. Téc. Univ. Zulta* Vol. 31, No.1. 2008. Pp. 3-12.
- [4] L. Mandow, J. Coego, F. Villalba, "Herramienta de software para la enseñanza de algoritmos de búsqueda". *III Jornadas de Innovación Educativa y Enseñanza Virtual en la Universidad de Málaga*. 2009.
- [5] F. Cárdenas Varela, N. Castillo Izquierdo, E. Daza Castillo, "Editor e intérprete de algoritmos representados en diagramas de flujo". *Informática educativa UNIANDES – LIDIE*, Vol. 11, No. 1, 1998. pp. 101-106,
- [6] E. Roberts, "An overview of MiniJava". *Proceedings of the thirty-second SIGCSE technical symposium on Computer Science Education SIGCSE '01*. 2001. Pp. 1-5
- [7] F. Meza, R. Garrido, C. Astudillo, *Un Lenguaje de Bajo Nivel como Apoyo al Aprendizaje en el Primer Curso de Programación de las Carreras de Ingeniería*. 2002.

- [8] J.E. Labra Gayo, M. Morales Gil, R. Turrado C. Plataforma de enseñanza de lenguajes de programación a través de Internet: Proyecto IDEFIX. 2002. Universidad de Oviedo. España.
- [9] N. Moroni, P. Señas, "Estrategias para la enseñanza de la programación". Primeras Jornadas de Educación en Informática y TICS en Argentina- JEITICS 2005.
- [10] C. Kelleher, *Motivating Programming: using storytelling to make computer programming attractive to middle school girls*. 2006. Carnegie Mellon University. Pittsburgh.
- [11] A. S. Scott, M. Watkins, D. McPhee, "Progranimate – A Web Enabled Algorithmic Problem Solving Application". Proceedings of the 2008 International Conference on E-Learning, E-Business, Enterprise Information Systems, and E-Government. July 2008.
- [12] M. A. Cruz-Chávez, J. C. Zavala-Díaz (Eds): *CICos 2008, Una herramienta y técnica para la enseñanza de la programación*. ISBN: 978-607-00-0165-9. 2008.
- [13] M. Resnick, J. Maloney, A. Monroy-Hernández, et all, "Scratch: Programming for All". *Communications of the ACM*. Vol. 52. No. 11. November 2009. Pp. 60-67.
- [14] I. Hernán Lozada, C. A. Lázaro Carrascosa, J. A. Velázquez Iturbide, "Hacia el diseño de herramientas educativas de programación basadas en la taxonomía de Bloom". *Proc. Of 5° Simposio Internacional en Informática Educativa (SIIE)*. 2003. Pp. 761-765.
- [15] L. López Román, *Programación Estructurada. Un enfoque algorítmico*. ISBN: 9701508564, 2da edición. 2003. Alfaomega. México.
- [16] M. Blom, E. J. Nordby, A. Brunstrom, "Teaching semantic aspects of OO programming". *Fifth Workshop on Pedagogies and Tools for Assimilating Object-Oriented Concepts, OOSLAP*. 2001.
- [17] G. F. Cendales, M. P. Díaz, R. J. Barros, "SIGACLE: Simulador grafico asistido por computador para la enseñanza de programación de lenguajes estructurados". *IV Congreso RIBIE*. 1998.

- [18] J. P. Cardona, F. J. Álvarez, J. Muñoz, Estrategia Instruccional para la enseñanza de lenguaje de programación introductorio implementada con objetos de aprendizaje. 2007. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- [19] J. J. Arellano Pimentel, O. Nieva García, "ABEA, Herramienta de apoyo en la enseñanza de algoritmos y habilidades de programación". VI Semana Nacional de Ingeniería en Electrónico (SENIE). Octubre 2010. Pp. 193-202.
- [20] J. Villalobos, D. Pérez, J. Castro, C. Jiménez, "Construcción de un Laboratorio Flexible de Estructuras de Datos". En: XIII Congreso Iberoamericano de Educación Superior en Computación. Octubre 2005.
- [21] M. J. Cabrero Canosa, J. Blanco Gutiérrez, "Tutorial gráfico interactivo de estructuras de datos". XIII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática (JENUI). 2007.
- [22] C. Segura, I. Pita, "Una herramienta para el estudio de Estructura de Datos y algoritmos". III Jornada Campus Virtual UCM. 2007.
- [23] J. A. Sandoval Bringas, M. Carreño León, I. Estrada Cota, F. Aispuro, J. Suarez Villavicencio, Utilización de una herramienta didáctica para cursos básicos de EdD. 2006. Universidad Autónoma de Baja California Sur. Baja California Sur.
- [24] A. Baker, E. Oh Navarro, and A.V. Der Hoek, "An Experimental Card Game for Teaching Software Engineering Processes". Journal of System and Software. Vol. 75. ISSUES 1-2. Feb 2005. Pp 3-16.
- [25] P. Zavaleta Carrillo, D. Pérez Cruz, Pérez Rejón, José A, Métodos, técnicas y herramientas para la enseñanza de la programación. Marzo 2014. Universidad Autónoma del Carmen. Campeche, México. Pp. 18-23.

## **7. Autores**

M.C. Zavaleta Carrillo Patricia obtuvo su título de Maestría en Ciencias en Ciencias Computacionales con especialidad en Ingeniería de Software en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en Cuernavaca, Morelos, México.

M.C. Pérez Cruz Dámaris obtuvo su título de Maestría en Ciencias Computacionales con especialidad en Ingeniería de Software en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP), San Andrés Cholula, Puebla, México.

Dr. José Felipe Cocón Juárez obtuvo su título de Doctor por la universidad Rey Juan Carlos mediante el programa de doctorado en Tecnologías de Información y Sistemas Informáticos impartida en la Universidad Rey Juan Carlos- Comunidad de Móstoles, Madrid, España

Dra. Elvia Elvira Morales Turrubiates obtuvo su título de Doctora en Sistemas Computacionales en la Universidad del Sur, Chiapas, México.



# ENSEÑANZA DE LA TEORÍA DE CONTROL UTILIZANDO LA METODOLOGÍA DE APRENDIZAJE POR PROYECTOS

**Joel Ricardo Jiménez Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

*jcjr@xanum.uam.mx*

## Resumen

En la época actual, la metodología del aprendizaje por proyectos (ApP) ha demostrado su eficacia en la educación, ya sea ésta en forma presencial, semipresencial o virtual. En este trabajo se describe su utilización en un curso de teoría de control donde tradicionalmente, en Ingeniería, se le considera como un curso muy teórico al que hace falta incorporar experimentos que motiven, activen y muestren a los estudiantes las aplicaciones potenciales de esta área en muy diversos campos del conocimiento. Al principio del periodo escolar se asigna un proyecto que involucra el diseño e implementación de un sistema de control retroalimentado de un “helicóptero de un grado de libertad”. El proyecto tiene asociadas varias prácticas que van apoyando su realización. El reporte final incluye la descripción formal de los elementos del sistema retroalimentado, el modelado, la simulación de la dinámica del sistema utilizando Matlab, Simulink y Arduino y su implementación física. El ApP promueve un aprendizaje centrado en el alumno y en el trabajo en equipo que proporciona un entendimiento más profundo de la teoría de los sistemas de control.

**Palabras Clave:** Aprendizaje por proyectos, Arduino, Matlab, modelado, simulación, Simulink, teoría del control.

## 1. Introducción

La teoría de control es un campo interdisciplinario que estudia el comportamiento de los sistemas dinámicos y cómo éstos se modifican por el uso de la retroalimentación. En la figura 1 se muestra la trayectoria de la

retroalimentación para controlar el comportamiento del sistema al comparar el valor de referencia con el valor medido y así, de acuerdo a una estrategia de control, obtener la salida deseada [1]. El objetivo de esta teoría es controlar un proceso o planta para que su salida se apegue a un valor de referencia o setpoint que puede ser fijo o variable en el tiempo. Los diversos tópicos que se estudian en la teoría de control son: la estabilidad, la controlabilidad y la observabilidad y el concepto de la función de transferencia que describe la conducta del sistema en base a un conjunto de ecuaciones diferenciales que relacionan la salida con la entrada. Las aplicaciones teóricas y prácticas de la teoría de control abarcan los sistemas que manifiesten una retroalimentación, así tenemos aplicaciones en procesos industriales, fisiológicos, sociológicos, psicológicos, ecológicos [2].



Figura 1 Elementos más importantes de un sistema de control retroalimentado.

La enseñanza de un primer curso introductorio de la teoría de control a nivel licenciatura es desafiante debido a que se necesita cubrir y balancear de manera apropiada el material teórico de índole matemático y la experimentación con el fin de entender los principios y fundamentos de la dinámica de los sistemas retroalimentados. Por otro lado, es apropiado incluir material novedoso que esté relacionado con las muy diversas aplicaciones del modelado, la simulación y la implementación de procesos automáticos.

Un enfoque de enseñanza-aprendizaje que puede lograr el balance en este doble objetivo es el de asignar un proyecto que se vaya desarrollando durante el curso y en el cual se vayan integrando los conceptos teóricos y experimentales. El proyecto, según va avanzando, va definiendo y marcando la provisión de materiales y la teoría que se va viendo en clase [3, 4].

Una idea central es motivar al estudiante para que busque la información y el conocimiento que complementa lo que se vea en clase y ayude al propósito del proyecto, desarrollando las habilidades y capacidades de un aprendizaje necesaria en la época actual. Otra característica importante es la inducción al trabajo en equipo para desarrollar las capacidades de cooperación y colaboración. Los estudios al respecto del aprendizaje por proyectos (ApP) sugieren que al ser un enfoque basado en el constructivismo, los estudiantes retienen mejor la información y adquieren el conocimiento de forma más profunda y duradera [5].

En este trabajo se describen las experiencias de enseñanza aprendizaje en el curso optativo denominado "Control de sistemas lineales" que ofrece el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I) a los estudiantes de los últimos trimestres de las Licenciaturas en Computación, Ingeniería Biomédica y Electrónica.

El proyecto "helicóptero de un grado de libertad" que se aborda en el curso trata del control de un motor con hélice que hace levitar una barra simulando el ascenso y descenso de un helicóptero o de un cuádróptero. El controlador se implementa en una tarjeta Arduino. El propósito del proyecto es aprender la teoría y la práctica del diseño y la programación de controladores y cómo se usan los modelos matemáticos para diseñar sistemas estables que mejoran su respuesta en el tiempo, la exactitud en el seguimiento de una trayectoria y el rechazo a las perturbaciones. Con esta experiencia educativa, los estudiantes pueden abordar otras aplicaciones como la robótica o los controladores industriales.

En las secciones que siguen se describe el método del ApP y los detalles de la elaboración del curso que incluyen el desarrollo del proyecto de un "helicóptero de un grado de libertad" y las experiencias surgidas con la aplicación de este método.

### **El concepto del aprendizaje por proyectos**

El ApP es una estrategia pedagógica útil para desarrollar conocimientos y experiencias afrontando situaciones similares a las del mundo real, no sólo en términos individuales sino también dentro de una acción coordinada en equipo. En el ApP se produce una "simulación" de la actividad real en un contexto controlado

y de bajo costo, como medio para desarrollar habilidades, destrezas, actitudes y competencias concretas. En el ApP se cultiva la capacidad de ejecución y la visión de conjunto para evaluar situaciones nuevas, tomar decisiones y resolver problemas en forma colaborativa, dimensiones que son significativas en el desarrollo profesional [6].

El ApP es una pedagogía centrada en el alumno que involucra la aplicación de un enfoque dinámico en el salón de clases, en la cual los estudiantes adquieren un conocimiento más profundo y significativo a través de la exploración activa de problemas o proyectos del mundo real. Los estudiantes aprenden la materia al trabajar por periodos medianamente largos como trimestres, cuatrimestres o semestres con el fin de investigar y resolver preguntas, desafíos o problemas complejos. Es una forma de aprendizaje activo basado en la investigación e indagación que combina el conocer con el hacer [7].

En el ApP el profesor y los estudiantes se organizan en función de un proyecto que tiene aplicación real. Esta forma de aprendizaje tiene sus raíces en el constructivismo, que evolucionó a partir de los trabajos de psicólogos y educadores como Lev Vygotsky, Jerome Bruner, Jean Piaget y John Dewey [8].

El ApP puede ser visto como un método de instrucción, una estrategia de aprendizaje o una estrategia de trabajo y se caracteriza porque el profesor y los alumnos realizan un trabajo en equipo sobre un tema real, integrando perspectivas y experiencias en forma grupal e individual. El enfoque de ApP se presta para integrar de manera adecuada la conexión entre los diferentes tópicos del curso y de esta manera incrementar la atención y la motivación de los estudiantes [9].

En el ApP el profesor trabaja como un guía y facilitador del material y de las discusiones. Se pueden hacer ejemplos y preguntas muy dirigidas para que los estudiantes reflexionen sobre los temas tratados. La evaluación se puede realizar en forma grupal, por pares o propia. El propósito principal de la evaluación es observar la evolución del aprendizaje y las sugerencias que pueden surgir para mejorar el curso [10].

Es por ello que es deseable que el profesor conozca y tenga experiencia tanto en la dinámica de grupos como en el entendimiento y trasmisión de conocimientos matemáticos, ingenieriles y técnicos.

Las tareas asociadas a un proyecto definen el aprendizaje de los temas del curso. Estas tareas deben inspirar y motivar al estudiante para que incrementen su conocimiento, formule avances del proyecto e identifique y planee la secuencia de actividades para finalmente resolver el proyecto. Hay actividades que se realizan repartiendo tareas entre los miembros del grupo y otras que hace de manera individual. De esta manera el aprendizaje está dirigido por la meta de finalizar el proyecto y cada estudiante se hace responsable de su propio aprendizaje.

En la sección que sigue se formulan con cuidado todas las fases del proyecto para definir de manera clara las metas de aprendizaje.

### **El proyecto “helicóptero de un grado de libertad”**

El proyecto se presenta al principio del trimestre y conlleva el diseño e implementación de un sistema de control retroalimentado de un “helicóptero de un grado de libertad”. El proyecto se derivó principalmente de un curso MOOC de la plataforma Edx intitulado “Introducción a la teoría del control retroalimentado” [11]. En el proyecto se controla la posición de una barra con un motor y una hélice en el extremo que presenta un grado de libertad. La barra gira respecto a un eje que pasa por su centro de gravedad, el movimiento de giro será provocado por una fuerza de empuje producida por una hélice y un motor de corriente directa, de manera que controlando la velocidad de giro del motor se podrá regular la fuerza de empuje que actúa sobre la barra y con ello la posición de la misma (figura 2). El énfasis en el diseño e implementación del prototipo es la naturaleza dinámica del sistema construido, considerando la respuesta estable y la respuesta transitoria [12].

## **2. Desarrollo**

El curso de “Control de sistemas lineales” es un curso introductorio de la teoría de control que integra las disciplinas de matemáticas (en particular la solución a

ecuaciones diferenciales), programación y electrónica. En general, las clases combinan clases tradicionales con teoría y ejercicios, prácticas de laboratorio y la técnica pedagógica de las clases invertidas en donde predomina la asesoría del material cubierto en clase o el material encontrado por el alumno en fuentes bibliográficas o en Internet.

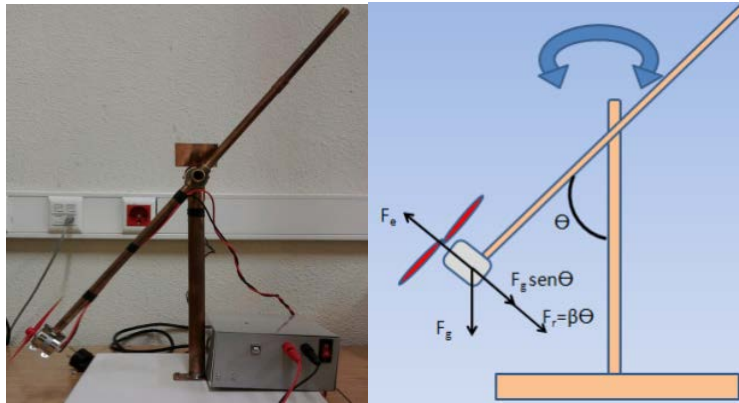


Figura 2 Montaje del proyecto "helicóptero de un grado de libertad". [13]

El curso tiene una duración de un trimestre (11 semanas) y en él se cubre el comportamiento dinámico de procesos y los sistemas de control retroalimentados. A la semana se tiene dos sesiones en el salón de clases y una en el laboratorio. En las clases se discuten los aspectos generales del modelado y cómo afectan las perturbaciones a un proceso o planta, en relación con los conceptos de función de transferencia, maya abierta, retroalimentación positiva o negativa, y el diseño de una estrategia de control ya sea proporcional, derivativa, integral o una combinación de ellas.

Los ejercicios de simulación son especialmente valiosos para aprender la calibración de los sistemas y el desarrollo de los algoritmos. Se enseña cómo resolver las ecuaciones diferenciales ordinarias utilizando Matlab y Simulink, dando un énfasis especial al análisis y diseño de sistemas de control retroalimentado [14, 15].

En el proyecto se trabaja en forma colaborativa en grupos de dos a tres estudiantes que implementan el sistema de control y describen su solución a través de reportes que se entregan aproximadamente cada dos semanas y un

reporte final con la simulación dinámica y el prototipo funcionando para validar las soluciones propuestas. Se proporciona asesoría por parte del maestro o en algunas ocasiones de los propios estudiantes que van más adelantados que sus compañeros, como se puede apreciar en la imagen de la figura 3. De esta manera se trata de lograr que todos los estudiantes tengan el mismo nivel de conocimientos.

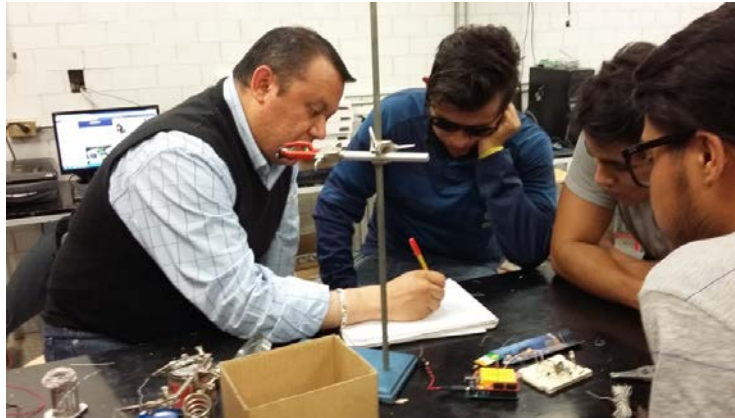


Figura 3 Trabajo colaborativo en equipo para el desarrollo del proyecto.

Aproximadamente cada dos semanas se entregan reportes de las prácticas realizadas. Los reportes se califican y se retroalimentan a los estudiantes para mejorar su documentación. Se comenta a los alumnos que cada uno de estos reportes va a formar parte del reporte final, de esta manera el reporte final se va puliendo en cada avance del proyecto reportado.

El contenido en forma resumida que se cubre en el curso es:

- Introducción a los sistemas de control
- Modelado de procesos dinámicos (desarrollo de modelos matemáticos, solución a ecuaciones diferenciales, diagramas de bloques y funciones de transferencia, comportamiento dinámico de sistemas de primer y segundo orden)
- Análisis y diseño de sistemas de control retroalimentado (dinámica de malla cerrada, análisis de estabilidad, calibración de sistemas)

La secuencia de presentación del material teórico está guiada por el proyecto “helicóptero de un grado de libertad”. Después de una introducción a los sistemas de control, el curso cubre de manera breve las características de sensores y actuadores. A continuación se revisan los modelos dinámicos de sistemas físicos a través de ecuaciones diferenciales y su solución a través de la transformada de Laplace y las funciones de transferencia utilizando Matlab y Simulink. Como un ejemplo de un sistema de segundo orden, en la figura 4 se muestra la simulación de un circuito RLC en serie con diferentes respuestas de acuerdo al ajuste de parámetros [16, 17]. Este enfoque de simulación es útil para mostrar los conceptos básicos como la respuesta dinámica y la estabilidad de los sistemas.

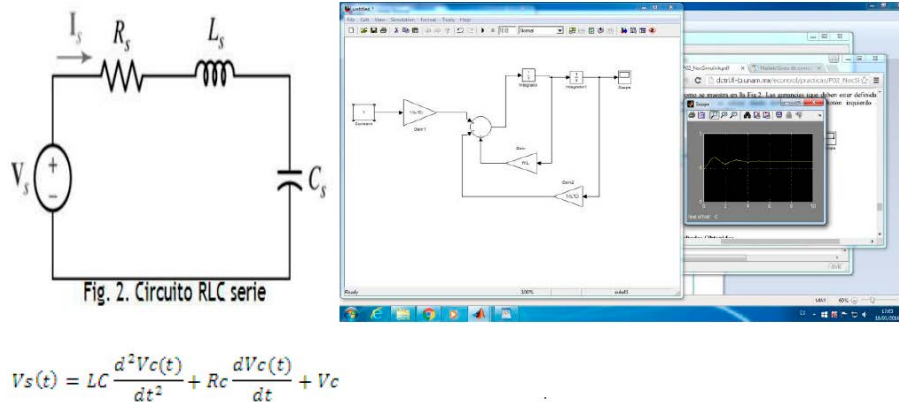


Figura 4 Uso de Simulink para simular el comportamiento de un circuito RLC en serie.

El cronograma de actividades de las prácticas que se desarrollan durante el trimestre se muestra en la tabla 1. Cada práctica es acompañada de un reporte donde se documenta lo que se realizó y lo que se investigó.

Tabla 1 Cronograma de actividades para desarrollar el proyecto y su documentación.

Actividades de cada práctica	Semana del trimestre					
	2	4	6	8	10	11
Familiarización con Matlab y Simulink						
Familiarización con Matlab, Simulink y Arduino						
Ensamblado del helicóptero y modelado de malla abierta						
Diseño del controlador PID, calibración y simulaciones						
Pruebas y demostración final						
Reporte final						



## **Recursos de aprendizaje**

Los recursos de aprendizaje consisten en libros, enlaces a blogs, sitios web y referencias a 3 cursos masivos abiertos en línea (MOOCs; Massive Open Online Courses) que en la sección siguiente se explican. También se promueve de manera particular y enfática la búsqueda de información relacionada con el proyecto por parte del alumno.

Los recursos de enseñanza aprendizaje se coordinan a través de un aula virtual en Moodle (Virtu@mi:

*<http://virtuami.izt.uam.mx/aulas/apresencial/course/info.php?id=546>*).

## **Cursos MOOC que apoyan al curso**

El curso presencial se ve apoyado fehacientemente por 3 cursos MOOCs que contienen mucha información teórica y práctica importante.

El curso de la plataforma educativa Edx denominado “Control y Dinámica” [18] es un curso de 6 semanas de duración que revisa de manera interactiva los conceptos de sistemas, dinámica, control y su impacto en las actividades humanas. Se introducen varios ejemplos naturales y artificiales y se señala que la conducta de un sistema se puede modificar al agregarle un sistema de control. Se revisan el diseño, los beneficios y las propiedades de los sistemas controlados.

En el curso de 3 semanas de la plataforma Edx llamado “Introducción a la teoría del control retroalimentado” [11] se aprende como diseñar y construir una barra que sube y baja por medio de un motor con hélice. Hace uso de la tarjeta Arduino Uno y de programas que implementan el controlador del sistema en Python. Se modela el sistema utilizando ecuaciones diferenciales, se estudia el tema de estabilidad de manera teórica y práctica. También se aprende a realizar mediciones del desempeño del sistema de control y cómo las estrategias de control PID regulan el sistema y lo hacen menos vulnerable a las perturbaciones internas y externas que puede sufrir el sistema controlado.

En el curso de 4 semanas “Todo es lo mismo: Modelando sistemas ingenieriles” [19] se aprenden técnicas de análisis y modelado que se aplican a sistemas eléctricos, mecánicos y químicos. Se comienza con descripciones algebraicas de

los componentes individuales y se desarrollan herramientas para el modelado. Los ingredientes principales son las ecuaciones diferenciales de los componentes y del sistema. Se establecen analogías de funcionamiento entre los sistemas eléctrico, mecánico y químico. Se utilizan varios casos de estudios de áreas de la ingeniería para ilustrar las técnicas de modelado. Se promueven los experimentos manuales que demuestran la efectividad de estas técnicas.

### **Sobre las herramientas utilizadas en el curso**

En el curso se hace uso extensivo de Matlab y Simulink para mostrar los datos de los sensores y actuadores conectados a Arduino e para incorporar funciones matemáticas, de procesamiento de señales o rutinas que modelan la dinámica de sistemas de control [20]. Matlab y Simulink tienen funciones para leer, escribir, graficar y analizar datos de los sensores de manera interactiva, se pueden crear modelos, simular, ajustar parámetros y generar de manera automática el código de un programa. El código de los algoritmos se descarga en la memoria del microcontrolador para que éstos se ejecuten de manera independiente en el prototipo construido.

Para familiarizarse con estas herramientas se tienen una serie de videos de varios sitios en Internet que describe los pasos y los modos de ejecución para instalar y utilizar los paquetes de soporte. Desde MATLAB es posible controlar las entradas y salidas de la tarjeta Arduino, obteniendo información de los sensores y controlando los diferentes actuadores que se hayan conectado. Toda la ejecución del algoritmo ocurre en MATLAB en tiempo real. Desde Simulink, se puede desarrollar un modelo, utilizando la biblioteca de bloques para que los algoritmos se ejecuten en modo embebido y autónomo en el procesador de Arduino, sin necesidad de tener la tarjeta conectada a la computadora [21].

### **3. Resultados**

Como se ha comentado, desde el principio del trimestre se propone y promueve el proyecto y se integran los temas teóricos y de experimentación. Se comienza con la introducción a Matlab y Simulink y se continúa con la integración de Arduino

que acompañan la teoría sobre ecuaciones diferenciales y su solución. A continuación se construye la estructura del proyecto como se ejemplifica en la figura 5.



Figura 5 Trabajando con el prototipo.

En la parte final del curso se implementa en el prototipo, el sistema retroalimentado de la figura 6 que busca cumplir con la ley de control que se ejemplifica en la figura 7.

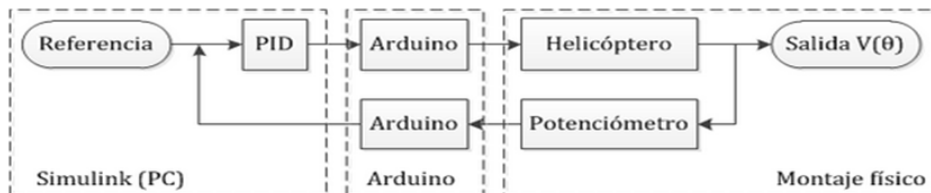


Figura 6 Sistema del control del proyecto [12].

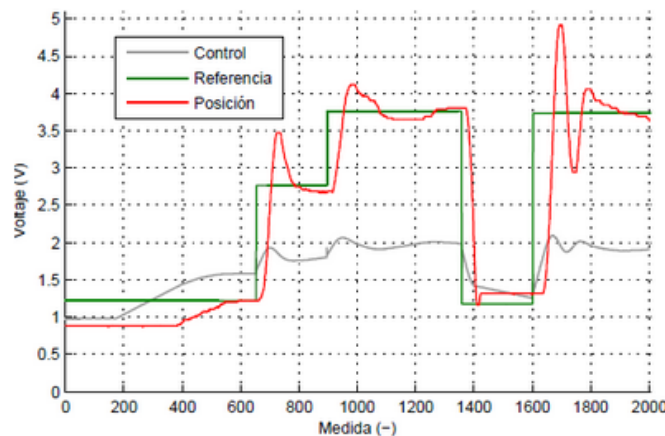


Figura 7 Se muestra cómo el controlador sigue a la señal de referencia [12].

Las ecuaciones diferenciales del modelo se resuelven en Matlab y Simulink de manera más sencilla que utilizando otros lenguajes o simuladores. De esta manera el enfoque principal se encuentra en el planteamiento del modelo y en el análisis de resultados. La solución utilizando estas herramientas disminuye el cuello de botella en el proceso de obtener la respuesta dinámica por medio del modelado matemático.

También se pueden observar el funcionamiento del prototipo utilizando una interfaz gráfica realizada con Python como se puede observar en la figura 8. En esta interfaz se aprecian el ángulo de la barra, el error del sistema, la señal de alimentación al motor y la derivada del error.

Con el entrenamiento en el desarrollo del proyecto, los estudiantes son capaces de desarrollar modelos dinámicos para los componentes y simular el comportamiento dinámico de los sistemas retroalimentados para diseñar prototipos de sistemas de control.

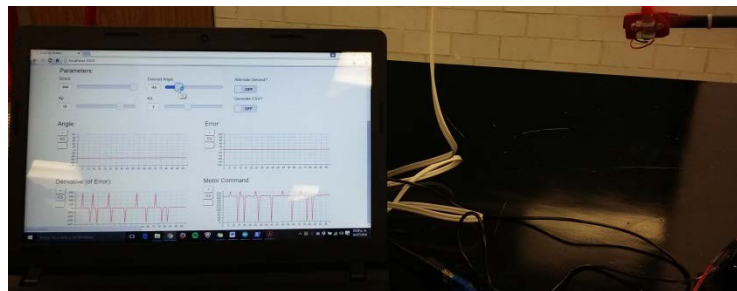


Figura 8 Gráficas de funcionamiento del prototipo utilizando un servidor en Python [11]

Se ha observado que los estudiantes, trabajando en equipo, participan más con el fin de lograr la terminación del proyecto final. Los estudiantes se hacen responsables de su propio aprendizaje en un grado mayor en comparación que cuando el curso no está basado en una estrategia basada en un proyecto (tabla 2). En el avance del proyecto se van generando reflexiones y evaluaciones para mejorar el proyecto y el desenvolvimiento del curso.

Desde el punto de vista del profesor, el trabajar con los estudiantes motivados es muy gratificante. Cuando se utilizan las técnicas del ApP y de la clase invertida, el tiempo y el trabajo son de más calidad porque las clases se convierten en una

especie de entrenamiento acompañado. Todo esto sirve a los alumnos para enfrentarse a nuevos problemas y a saber estructurar de mejor manera las tareas difíciles.

Tabla 2 Comparativa de estrategias de enseñanza y aprendizaje [22].

<b>PARA ALCANZAR LAS COMPETENCIAS DE LA ASIGNATURA, EN QUÉ MEDIDA TE HAN RESULTADO ÚTILES:</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica</b>
Las clases magistrales o teóricas	4,84	1,34
Las actividades de aprendizaje autónomo (estudio y trabajo individual)	5,23	1,18
El aprendizaje orientado a proyectos (el diseño y el desarrollo de un proyecto de investigación)	5,39	1,09
El aprendizaje colaborativo (el trabajo en grupo para desarrollar el proyecto anterior)	5,58	1,26
Las actividades de reflexión (portafolio digital)	4,71	1,13
El aprendizaje a través de la interacción y actividad grupal (análisis de casos y / o la resolución de problemas prácticos en grupo).	4,84	1,49
Las tutorías	4,19	1,62
<b>TOTAL DE LA DIMENSIÓN</b>	<b>34,81</b>	<b>5,84</b>

#### 4. Discusión

Los reportes del avance del proyecto ayudan mucho a marcar el paso de los avances del proyecto, proporcionan retroalimentación y van produciendo un reporte final de alta calidad. Los reportes mantienen un trabajo constante en el avance del proyecto al tiempo que integran conceptos teóricos vistos en clase. Con la evaluación de los reportes se pueden proporcionar retroalimentaciones, por un lado a los alumnos para mejorar el diseño y la documentación del proyecto y por otro lado al profesor para que vaya realizando los ajustes pertinentes al desarrollo del curso.

Se obtiene un mayor beneficio si se pide a los estudiantes que los reportes intermedios se piensen como secciones del reporte final. En esta forma, cada entrega se convierte en un borrador del reporte final. Puesto que el diseño es un proceso iterativo, los estudiantes revisan sus borradores y reflejan los cambios en su diseño. Solo se requiere al final, una revisión e integración de la secuencia de presentación de los temas. También trabajando de esta manera se facilita la evaluación final.

El diseño de sistemas de control es como una forma de arte científico guiado por técnicas y estrategias que se aprenden mejor practicando el pulimiento de un diseño e implementando paso a paso un proyecto real final.

Los reportes van completando paulatinamente el proyecto y cada grupo va realizando sus propios ajustes en su desarrollo. Los reportes parciales tienen menor peso que el reporte final, de tal manera que si se comenten errores, estos no se penalizan grandemente. Sin embargo, es importante que se observen los errores para mejorar el diseño. Los exámenes también tienen el propósito de evaluar la teoría y observar si los estudiantes han alcanzado las metas de aprendizaje.

El enfoque de enseñanza del ApP que está centrado en los alumnos proporciona un mayor entendimiento de la materia, los motiva a ayudarse entre sí, a desarrollar su progreso y autonomía y a observar cómo se puede aplicar la teoría de control en diversas aplicaciones reales (tabla 3). El proyecto ayuda a desarrollar las habilidades de modelado, simulación, ajustes de control y a tener una visión global de un sistema retroalimentado.

Tabla 3 Satisfacción del alumno con el uso del enfoque ApP [22].

<b>DESPUÉS DE LA ASIGNATURA ME SIENTO SATISFECHO/A DE:</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación típica</b>
La manera de impartir las clases	5,16	1,39
El proceso y el progreso de mi aprendizaje	5,35	1,05
La autonomía para desarrollar mi aprendizaje	<b>5,42</b>	0,96
<b>TOTAL DE LA DIMENSIÓN</b>	<b>15,94</b>	<b>2,84</b>

Sin embargo, en la utilización del ApP, se han observado las siguientes desventajas:

- En la preparación teórica del curso, en la búsqueda de las partes necesarias para el proyecto y en las asesorías se consume mayor tiempo que en una clase tradicional. Sobre todo, si no se encuentran las partes del prototipo se va retrasando su construcción y se desajustando las partes teóricas de las prácticas.

- En el ApP hay una cierta tendencia a la creación de un producto final que sea la fuerza dirigente de las actividades en la clase. Cuando esto sucede, el proyecto puede hacer perder la revisión de temas teóricos importantes y puede hacer ineficiente que los estudiantes aprendan ciertos conceptos y habilidades.
- Si los alumnos no asisten con regularidad a clases se afecta la continuidad del proyecto y no todos los equipos avanzan con el mismo ritmo, lo cual demerita el trabajo y hace que sea más lento el avance en la teoría y en la práctica.
- Se pueden presentar los vicios del trabajo en equipo: que ciertos miembros no trabajan de manera equitativa; que algunos alumnos copien el trabajo realizado por miembros más interesados y motivados, etc.

## **5. Conclusiones**

En este artículo se describe la técnica y las experiencias surgidas por el uso de la metodología de ApP en el curso de la UAM-I “Control de sistemas lineales”. La clave de las actividades de enseñanza utilizando esta metodología es colocar al alumno en el centro del aprendizaje. Los estudiantes se hacen más responsables de sus propios estudios, la integración de diferentes tópicos se realiza de manera natural en la medida que hay la guía del proyecto final, lo que permite tomar una visión más global de la teoría del control y de las conexiones entre sus temas. La experiencia de trabajar en grupo también tiene muchas bondades y a veces varias desventajas.

El proyecto motiva a los estudiantes a aprender la teoría de control y a desarrollar habilidades relacionadas con el modelado, simulación e implementación de sistemas de control.

Sería recomendable que el curso se apoyara de las experiencias de otros estudiantes o asistentes que ya hayan tomado con anterioridad el curso o que tengan experiencia sobre el material.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] W. Bolton, Ingeniería de Control. 2ª Edición, 2006. Editorial Alfaomega. Página 413.
- [2] N. Andrei, "Modern Control Theory - A historical perspective". *Studies in Informatics and Control*, Vol.10, No.1, 2006. pp.51-62.
- [3] A. Hagenblad, I. Klein, "Teaching Control Theory Using Problem Based Learning". 12th EAEEIE conference, Nancy. 2001. Pp. 8.
- [4] Teaching feedback control theory using an integrating design project. <http://ojs.library.queensu.ca/index.php/PCEEA/article/view/5854/5577>.
- [5] S. Yazzi, Una experiencia práctica de Scrum a través del aprendizaje basado en proyectos mediado por TIC en un equipo distribuido. Universidad de Salamanca.
- [6] Aprendizaje basado en proyectos. <http://ceupromed.ucol.mx/revista/PdfArt/1/27.pdf>.
- [7] Wikipedia "Project-based learning". [https://en.wikipedia.org/wiki/Project-based\\_learning](https://en.wikipedia.org/wiki/Project-based_learning).
- [8] A. la Cueva, "La enseñanza por proyectos ¿mito o reto?". *Revista Iberoamericana de educación*. ISSN-e 1022-6508. Nº 16. 1998. Págs. 165-190.
- [9] Northwest Regional Educational Laboratory, Aprendizaje por Proyectos. <http://www.eduteka.org/modulos/8/252/468/1>.
- [10] Técnicas de Aprendizaje Basado en Proyectos, Universidad Politécnica de Cataluña. [http://www.uaeh.edu.mx/profesorado\\_honorario\\_visitante/miguel\\_valero/presentaciones/MaterialTallerPBL.pdf](http://www.uaeh.edu.mx/profesorado_honorario_visitante/miguel_valero/presentaciones/MaterialTallerPBL.pdf).
- [11] Introduction to Feedback Control Theory. <https://www.edx.org/course/introduction-feedback-control-theory-mitx-6-302-0x>.
- [12] Helicóptero de un grado de libertad. <https://wechoosethemoon.es/2011/07/21/arduino-matlab-simulink-controlador-pid/>.



- [13] Control de posición de un balancín con motor y hélice. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/1895/1/PFC-P%2026.pdf>
- [14] Analysis and design of control systems using Matlab. <http://prof.usb.ve/mirodriguez/Labcontrol/Analysis%20and%20Design%20of%20Control%20Systems%20using%20MATLAB.pdf>.
- [15] Control Engineering, An introduction with the use of Matlab. <https://kosalmath.files.wordpress.com/2010/08/control-engineering-matlab.pdf>.
- [16] Nociones de Matlab. [http://dctrl.fi-b.unam.mx/econtrol/practicas/P01\\_NocMatLab.pdf](http://dctrl.fi-b.unam.mx/econtrol/practicas/P01_NocMatLab.pdf).
- [17] Uso y manejo de Matlab y Simulink. Práctica N° 2. [http://dctrl.fi-b.unam.mx/econtrol/practicas/P02\\_NocSimulink.pdf](http://dctrl.fi-b.unam.mx/econtrol/practicas/P02_NocSimulink.pdf).
- [18] Interactive course about the basic concepts of Systems, Control and their impact in all the human activities. <https://www.edx.org/course/dynamics-control-upvalenciav-dc201x-1>
- [19] Everything is the same: Modeling Engineered Systems. Modeling and analysis techniques for electrical, mechanical, and chemical systems. <https://www.coursera.org/course/modelsystems>.
- [20] Medición de intensidad luminosa con Arduino. <http://www.mathworks.com/videos/series/arduino-light-meter-project-106518.html>.
- [21] Trabajando con Arduino, MATLAB y Simulink. <http://www.mathworks.com/videos/series/arduino-with-matlab-and-simulink-99406.html>.
- [22] R. Vilà, M. Rubio, V. Berlanga. “La investigación formativa a través del aprendizaje orientado a proyectos: una propuesta de innovación en el grado de pedagogía”. *Innovación Educativa*. N° 24. 2014. Pp. 241-258.

## **7. Autor**

Joel Ricardo Jiménez Cruz es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa y cultiva el área de conocimiento de la Cibernética.

# DESARROLLO DE UN SIMULADOR DIDÁCTICO DE REDES DE PETRI DE BAJO NIVEL

***Fernando Bautista Hernández***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*fbautistah@gmail.com*

***Ignacio Herrera Aguilar***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*iherrera@ito-depi.edu.mx*

***Oscar Osvaldo Sandoval González***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*osandoval@ito-depi.edu.mx*

***Gerardo Águila Rodríguez***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*gerardo\_aguila03@yahoo.com.mx*

***José Pastor Rodríguez Jarquin***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*jprj\_02@hotmail.com*

## **Resumen**

Este documento representa una propuesta de un simulador didáctico que puede emplearse para el aprendizaje de redes de Petri de bajo nivel que permitan al estudiante adentrarse en el manejo de los conceptos básicos de las mismas y en la formación de los modelos matemáticos que permiten llevar a cabo la evolución del marcado del sistema; éste se ha desarrollado tomando en cuenta las reglas

propias del comportamiento dinámico de las redes de Petri, que son fundamentales para llevar a cabo las transiciones en éstas.

El resultado obtenido es un programa de cómputo funcional que, comparado con otras herramientas gráficas, brinda la posibilidad de comprender la evolución del mercado bajo una perspectiva matemática.

**Palabra(s) Clave(s):** Simulador, didáctico, redes de Petri, evolución de mercado.

## 1. Introducción

Las redes de Petri (RdP o rdP), permiten representar de forma natural un modelo de eventos discretos, en éstas los eventos están asociados a transiciones y las actividades a lugares.

Éstas han sido ampliamente difundidas como una herramienta de modelado gráfico para la descripción de sistemas, se han empleado indistintamente en sistemas químicos, informáticos, de control de producción, así como en sistemas de manufactura automatizados comandados por controladores lógicos [1] [2], se ha incrementado el interés por el desarrollo de sistemas de control haciendo uso de las redes de Petri [3].

Para la enseñanza del modelado empleando redes de Petri es necesario contar con herramientas computacionales que permitan al estudiante conocer y poner en práctica la operación de los elementos que conforman a la misma.

Existe una gran cantidad de herramientas computacionales producto de trabajos de investigación de diferentes instituciones que sirven para llevar a cabo el diseño, análisis, y simulación de redes de Petri simples y de alto nivel [4] [5], sin embargo éstas herramientas, por lo general gráficas, no hacen mención del desarrollo matemático necesario para la comprensión de la evolución del mercado en redes de Petri, en [6] se muestra un desarrollo completo pero como una metodología con ejemplos no es un software que permita ingresar los datos de la red y nos muestre la evolución de la misma, en este trabajo se mostrará un simulador desarrollado para la comprensión de las bases matemáticas que permiten simular redes de Petri simples.

## 2. Desarrollo

Matemáticamente una rdP puede definirse a partir de la ecuación 1 de 5 elementos.

$$rdP = (P, T, A, W, M_0) \quad (1)$$

Donde el significado de cada una de las siglas utilizadas es el siguiente:

- $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_{np}\}$ : Conjunto de nodos tipo lugar.
- $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_{nt}\}$ : Conjunto de nodos tipo transición.
- $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_{na}\}$ : Conjunto de arcos de la rdP. Es subconjunto del producto cartesiano de todos los nodos P y T.
- $W = A_i \mid \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\} \forall A_i$ : Peso asociado a cada arco.
- $M_0 = P_i \mid \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\} \forall P_i$ : Número de marcas o tokens iniciales en cada nodo tipo lugar (marcado inicial).

El estado del sistema queda totalmente determinado por el número de marcas en cada nodo tipo lugar y puede describirse matemáticamente por el vector  $P$ .

Para representar y analizar la rdP es conveniente definir la función  $E(T_j)$  que representa el conjunto de lugares de entrada a la transición  $T_j$ . De forma similar, se puede definir la función  $S(T_j)$  para indicar los lugares de salida de la transición  $T_j$ ; ecuaciones 2 y 3.

$$E(T_j) = \{P_i \in P, (P_i, T_j) \in A\} \quad (2)$$

$$S(T_j) = \{P_i \in P, (T_j, P_i) \in A\} \quad (3)$$

Las reglas para simular el comportamiento dinámico de rdP son:

- Una transición  $T_i$  esta activada si cada uno de los nodos  $P_j$  tipo lugar que están conectados a la entrada contienen al menos  $W(P_j, T_i)$  marcas.  $W(P_j, T_i)$  representa el peso del arco que une el nodo  $P_j$  con la transición  $T_i$

(si en un arco no aparece su peso, se maneja el valor de 1), de forma resumida se dice que una transición  $T_i$  (ecuación 4):

$$M(P_j) \geq W(P_j, T_i) \forall P_j \in E(T_i) \quad (4)$$

Donde  $M(P_j)$  es el número de marcas en el nodo tipo lugar  $P_j$ .

- Una transición activada puede dispararse en cualquier momento.
- Como resultado de disparar una transición activada, se eliminan  $W(P_j, T_i)$  marcas de cada nodo  $P_j$  a la entrada de  $T_i$  y se añaden  $W(T_i, P_k)$  marcas a cada nodo  $P_k$  de salida de  $T_i$ .

Por lo anterior se consideró importante desarrollar una herramienta que permita comprender la evolución del marcado en una red de Petri, ecuación 5.

$$M_k = M_{k-1} + A^T \mu_k \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

Donde:

- $M_k$  Estado que se desea conocer.
- $M_{k-1}$  Vector de marcas del estado actual del sistema.
- $A^T$  Matriz de incidencia.
- $\mu_k$  Vector de transiciones.
- $k$  Número entero positivo.

La matriz de incidencia de ecuación 5 obtiene a través de ecuación 6.

$$A^T = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (6)$$

Donde:

- $a_{ij}^+$  Matriz de peso de arcos que entran al lugar  $i$  desde la transición  $j$ .
- $a_{ij}^-$  Matriz de peso de arcos que salen del lugar  $i$  y llegan a la transición  $j$ .

El diagrama a bloques del simulador desarrollado se muestra en figura 1.



Figura 1 Diagrama a bloques del simulador desarrollado.

Antes de iniciar la operación del simulador, es necesario ingresar los datos de la red a simular, (ver figura 2). A y B son números enteros positivos obtenidos de la red de Petri que desea simular, C es un vector columna en el que debe de ingresar el marcado inicial de la red ( $M_0$ ), D y E son los pesos de las matrices de entrada y salida respectivamente, estos serán ingresados en forma de una matriz  $m \times n$  donde las filas (m) serán los lugares y las columnas (n) serán las transiciones existentes en la red.

```
Número de lugares  
P = (A)  
Número de Transiciones  
T = (B)  
Matriz Inicial  
M = (C)  
Peso de Arcos de entrada  
a = (D)  
Peso de arcos de salida  
b = (E)
```

Figura 2 Interfaz de captura de datos de la red de Petri deseada.

Al ejecutar la simulación, la evolución del marcado será presentada como se muestra (ver figura 3), en F el estudiante podrá observar el total de iteraciones en

los que la evolución del marcado de la red es completada y en G tendrá la oportunidad de observar cómo se llevó a cabo dicha evolución, esto es, el desplazamiento de los tokens de acuerdo al peso de los arcos y su ubicación, paso a paso, en los diferentes lugares que conformar la red de Petri que este desee simular.

```
Iteracion: 1
Iteracion: 2
Iteracion: 3
Iteracion: 4
Iteracion: 5
Iteracion: 6
Iteracion: 7
NumIter =
      7 (F)
Evolucion =
  4   3   3   2   1   1   0
  1   2   0   1   2   0   1
  0   0   1   1   1   2   2 (G)
```

Figura 3 Despliegado de la solución de la red de Petri simulada.

### 3. Resultados

Para verificar el funcionamiento del simulador desarrollado, se demostró la evolución del marcado de una red de Petri y con uso de una herramienta grafica de simulación de redes de alto nivel como lo es CPN Tools [3] se corroboró el resultado obtenido, la red a simular tendrá las siguientes características:

Sea una operación de producción (Ejemplo 1) que para obtener una unidad de producto terminado hace uso de dos tipos de materias primas llamadas MP1 y MP2, de MP1 se requiere una unidad y existen en total 5 unidades y de MP2 se requieren dos unidades y en total existen 10 unidades, estas son procesadas de manera simultánea por una máquina.

Con la información anterior y empleando el simulador gráfico podemos dibujar la red correspondiente (figura 4).

De la simulación presentada se observa que existen 5 lugares (P1 a P5) y 2 transiciones (T1 y T2), los arcos que conectan a los lugares P1 y P2 con T1 tienen pesos diferentes, en el caso de P1 el peso es de 1 y para P2 el peso es de 2, el

peso del resto de los arcos de la red es de 1, la cantidad de tokens en cada lugar está determinada de acuerdo a tabla 1.

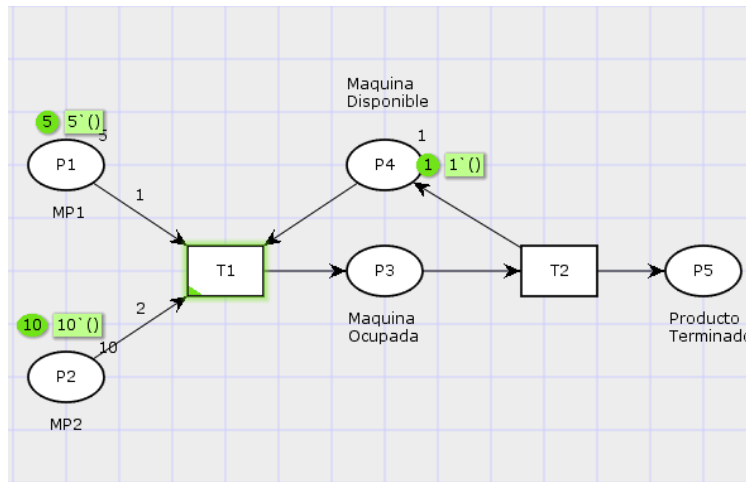


Figura 4 Simulación en CPN Tools de un proceso de producción.

Tabla 1 Relación de tokens asignados por lugar.

Lugar	Tokens
P1	5
P2	10
P3	0
P4	1
P5	0

Por lo que se puede deducir la matriz de tokens inicial como en la ecuación 7.

$$M_0 = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Para el caso de la matriz de incidencia se deben conocer  $aij^+$  y  $aij^-$ , por lo tanto, ecuación 8.

$$aij^+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad aij^- = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (8)$$



Cuando se ingresan los datos previamente obtenidos de la red a la pantalla de captura de red del simulador, estos quedan expresados de acuerdo a figura 5.

```
Número de lugares
P = 5
Número de Transiciones
T = 2
Matriz Inicial
M = [5 10 0 1 0]'
Peso de Arcos de entrada
a = [0 0; 0 0; 1 0; 0 1; 0 1]
Peso de arcos de salida
b = [1 0; 2 0; 0 1; 1 0; 0 0]
```

Figura 5 Captura de datos de la red de Petri en el simulador.

Cuando se inicializa el algoritmo del simulador, este determina las condiciones de inicialización de la red, así como los datos necesarios para llevar a cabo la evolución de la misma, por lo que la matriz de incidencia expresada en la ecuación 9 y la matriz de transiciones (Ec.10) son determinadas de manera automática.

$$A^T = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

La matriz de transiciones  $\mu_k$ , inicializa en 0 y conforme se va realizando la evolución del marcado los valores de las transiciones se van alternando entre transición no activada (0) y transición activada (1), por lo que para este caso la matriz está dada por ecuación 10:

$$\mu_k = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

El simulador lleva a cabo la solución de evolución del marcado vista previamente en la ecuación 5, por lo que, para el caso planteado, la evolución obtenida para el marcado ( $M_1$ ), estaría conformada por ecuaciones 11 y 12.

El resultado obtenido en  $M_1$  respecto a la evolución de los tokens se puede corroborar en la simulación realizada con el software CPN Tools (ver figura 6).

$$M_1 = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

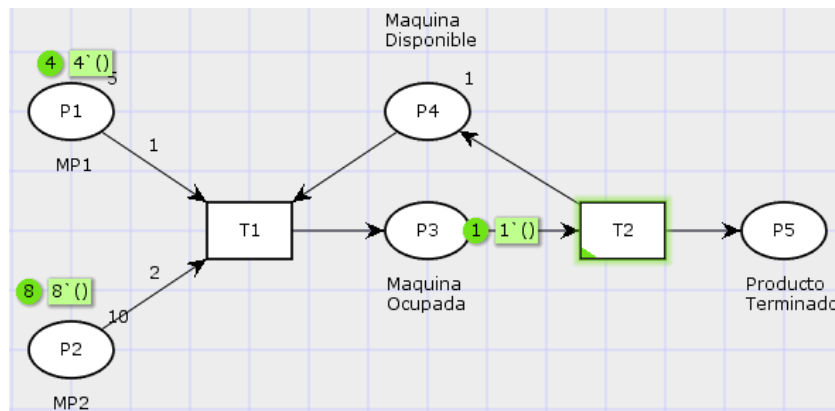


Figura 6 Evolución del marcado en la Red de Petri del ejemplo 1.

Se observa que hasta esta primera iteración no se ha conseguido producir una sola unidad de producto terminado, los tokens en los diferentes lugares de P1 a P4 se han modificado de acuerdo al peso asociado por cada arco, sin embargo, es necesario que el simulador lleve a cabo una nueva operación que permita continuar con la evolución de la red, por lo que la nueva operación a realizar es ecuación 13 y 14.

$$M_2 = \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & 0 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$M_2 = \begin{pmatrix} 4 \\ 8 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

En esta iteración se puede observar que una unidad de producto terminado fue realizada, lo cual se corrobora en la simulación contenida (figura 7).

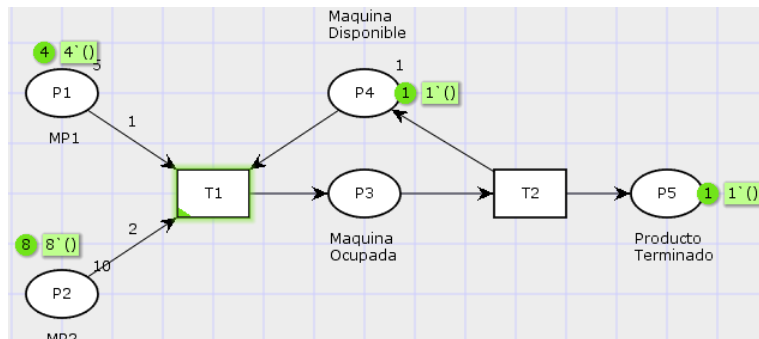


Figura 7 Evolución de la red de Petri y obtención de un producto terminado del ejemplo 1.

Se realizan las operaciones necesarias hasta obtener el total de productos terminados en el lugar 5, lo cual ocurre cuando ecuación 15:

$$M_{10} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 5 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Lo que significaría que el total de materias primas fueron utilizadas para la elaboración de 5 unidades de producto terminado como lo podemos observar en el lugar 5 de la red de Petri.

El comportamiento de la misma red en el software CPN tools nos confirma la operación mencionada anteriormente (figura 8).

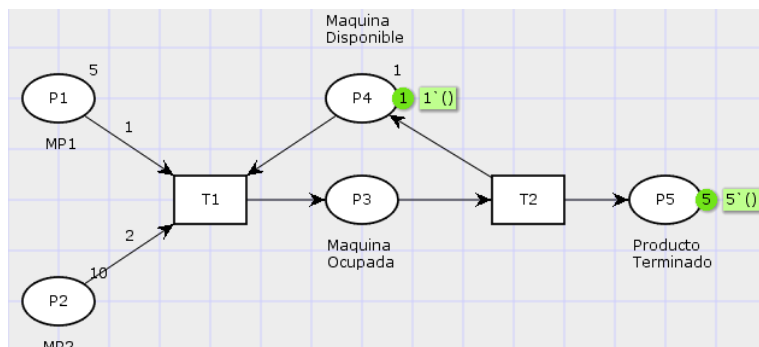


Figura 8 Evolución final de la red de Petri del ejemplo 1.

En la presentación del simulador desarrollado, se observa que los resultados obtenidos coinciden con lo plasmado gráficamente (figura 9), con lo que se puede asegurar que el funcionamiento de éste no presenta desviación alguna al comparar sus resultados con otro simulador, como se ha venido mostrando en las figuras 6 a 8.

```
Iteracion: 1
Iteracion: 2
Iteracion: 3
Iteracion: 4
Iteracion: 5
Iteracion: 6
Iteracion: 7
Iteracion: 8
Iteracion: 9
Iteracion: 10
NumIter =
    10
Evolucion =
    4  4  3  3  2  2  1  1  0  0
    8  8  6  6  4  4  2  2  0  0
    1  0  1  0  1  0  1  0  1  0
    0  1  0  1  0  1  0  1  0  1
    0  1  1  2  2  3  3  4  4  5
```

Figura 9 Evolución final de la red de Petri utilizando simulador desarrollado.

#### 4. Discusión

En [7,8,9] se presentan herramientas que permiten el aprendizaje y comprensión de redes de Petri, estas requieren de software especializado que no es de uso libre y no profundizaba en la composición de las ecuaciones matemáticas que permiten determinar la evolución del marcado, por lo que se decidió desarrollar un simulador didáctico que permite a los estudiantes profundizar en el uso de las operaciones del diseño de redes de Petri.

Se ha realizado una prueba con una muestra de 30 estudiantes de la asignatura Controladores Lógicos Programables del Instituto Tecnológico de Orizaba durante el semestre enero–junio 2016, en la cual se han obtenido diversos resultados, la mayoría aceptables por parte de los usuarios quienes han expresado que el uso de la herramienta les es de fácil comprensión y de ayuda para el aprendizaje de la evolución del marcado (figura 10).

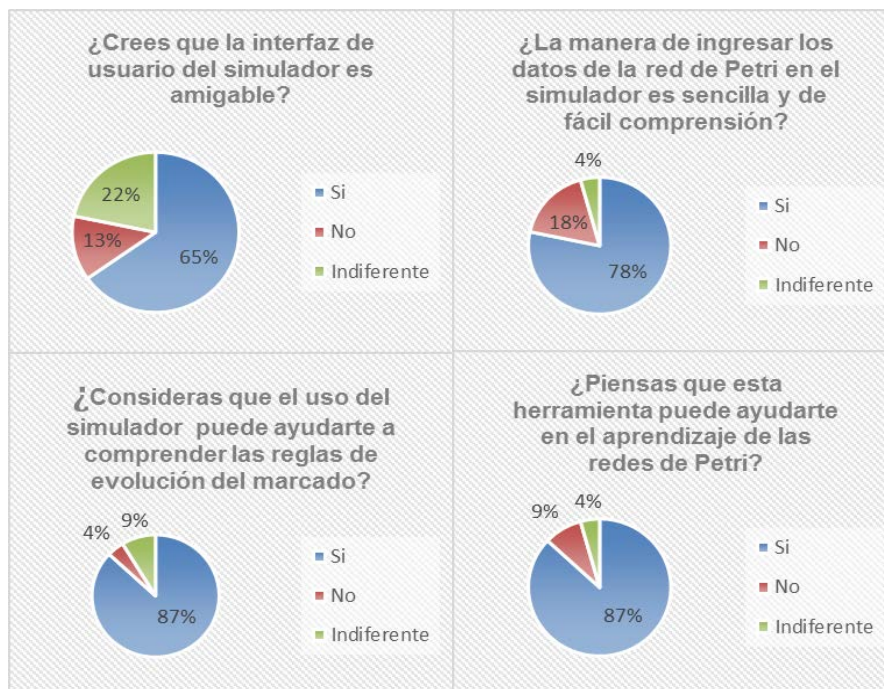


Figura 10 Resultados de la encuesta realizada a estudiantes del I.T.O.

## 5. Conclusiones

A pesar de que existen herramientas de simulación que permiten llevar a cabo el modelado en redes de Petri de procesos extensos y complejos, se deben de fincar las bases que posibiliten a los interesados estudiar sobre este tema comprender la formación del modelo matemático de una red, la correcta distribución del mercado inicial y la asignación del peso de los arcos en las matrices correspondientes, por lo que este simulador persigue el objetivo de que un principiante en el tema se involucre en el correcto llenado de las matrices de peso de arcos y comprenda la evolución del mercado de una red a modelar, los resultados obtenidos en el estudio realizado con estudiantes del I.T.O. muestra que esta herramienta puede ser de gran ayuda en el aprendizaje de redes de Petri, la muestra tomada en el estudio conoce sobre el tema y pudo aportar ideas para el mejor desarrollo del simulador, durante los siguientes semestres se continuará con la realización de pruebas con otros estudiantes para seguir enriqueciendo el simulador y poder obtener mejores resultados y mayor aceptación en la comunidad estudiantil.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] T. Murata, "Petri Nets: Properties, Analysis and Applications", Proceedings of the IEEE. Vol. 77. No. 4. April 1989. Pp 541 – 580.
- [2] R. David, H. Alla, "Petri nets for modeling of dynamic systems: A survey", *Automatica*. Vol. 30. No. 2. February 1994. Pp 175 – 202.
- [3] J.S. Lee, P. L. Hsu, "An improved evaluation of ladder logic diagrams and Petri nets for the sequence controller design in manufacturing systems", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 24. No. 3. 08-2004. Pp 279-287.
- [4] Petri Nets Tool Database Quick Overview, <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tools/quick.html>. May 2016.
- [5] F. A. Candelas, J. Sánchez, "Recursos Didácticos Basados en Internet Para el Apoyo de la Enseñanza de Materias del Área de Ingeniería de Sistemas y Automática", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. ISSN 1697-7912. Vol. 2 Núm. 2. Abril 2005. Pp. 93-101.
- [6] L. R. Baquero, L. E. Argota, O. Rodríguez, "Método para el Modelado y Prueba de Diagramas de Actividades Mediante Redes de Petri". *Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software*. ISSN 2314-2642, Vol. 3. Núm. 5. 2015. Pp. 206-212.
- [7] M. H. Matcovschi, C. Mahulea, C. Lefter, O. Pastravanu, "Petri Net Toolbox in Control Engineering Education". *Proc. IEEE Conference on Computer Aided Control Systems Design*. October 2006. Pp. 2298–2303.
- [8] G. Music, I. Hafner, F. Breiteneker, A. Körner, "Learning Petri Net Dynamics Through a Matlab Web Interface". 8<sup>th</sup> EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. Cardiff. September 2013. Pp. 324-329.
- [9] J. Figueras i Jové, A. Guasch i Petit, P. Fonseca i Casas, J. Casanovas-Garcia, "Teaching System Modelling and Simulation Through Petri Nets and Arena". *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference 2014*. December 2014. Pp. 3662-3673.

## **7. Autores**

Ing. Fernando Bautista Hernández, es ingeniero en electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba.

Dr. Ignacio Herrera Aguilar, obtuvo su título de PhD en Sistemas Automáticos por la Université Paul Sabatier en el año 2007.

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González, obtuvo su título de PhD en Robótica en la Scuola Superiore Sant'Anna en el año 2010.

Dr. Gerardo Águila Rodríguez, obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Electrónica en la SEES del CINVESTAV - I.P.N. en el año 2008.

Dr. José Pastor Rodríguez Jarquín, obtuvo su título de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en al año 2016.

# DESARROLLO DE MESAS INTERACTIVAS MULTITOQUE BASADAS EN TECNOLOGÍA CAPACITIVA

***Jesús Ramírez Ortega***

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

*jesus.ramirez@ccadet.unam.mx*

***Jorge de Jesús Hernández Vega***

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM

*jeorje918@gmail.com*

## **Resumen**

El propósito de este trabajo es desarrollar una mesa para actividades didácticas la cual se encuentre libre de teclados y ratones para controlar una PC y que, además, propicie la participación colaborativa en los estudiantes. La idea es dejar a un lado el que una persona en particular se apropie del uso del teclado y del ratón y, por consiguiente, mantenga el control de la PC. Con esta mesa se pretende que, básicamente con el uso de las manos, los estudiantes puedan manipular objetos reflejados en la pantalla reflejada sobre la superficie de la mesa y trabajar de manera conjunta, propiciando de esta manera, el desarrollo de trabajo colaborativo.

**Palabra(s) Clave(s):** Frame, infrarrojo, multitáctil, película capacitiva, superficie interactiva.

## **1. Introducción a las mesas táctiles**

En este apartado, mencionaremos las tecnologías que existen actualmente alrededor del desarrollo de superficies táctiles, con las cuales hemos trabajado y definir como está ubicado nuestro desarrollo en ese contexto

Las tecnologías multitáctiles son técnicas de interacción humano-computadora donde el usuario ingresa datos y órdenes a la computadora empleando una superficie táctil sin requerir de un mouse o un teclado de por medio, en estas



tecnologías tanto el hardware como el software son capaces de detectar y manipular múltiples puntos de contacto tanto simples como simultáneos. Actualmente, hay diversas técnicas que se basan sobre la iluminación infrarroja y efectos capacitivos.

### Iluminación Difusa (Diffused Illumination)

La Iluminación Difusa es una técnica donde se utiliza luz infrarroja para detectar y localizar cuando un dedo u objeto toca la superficie táctil.

En esta técnica se ilumina toda la parte inferior de la superficie de forma difusa para después ser captada por una cámara infrarroja, todo esto se coloca en el interior de una caja para evitar que la luz externa altere la detección y provoque toques falsos. Cuando se toca la superficie se concentra una gran cantidad de esta luz en el punto de contacto lo que genera una forma de luz brillante (figura 1), la cual es detectada por la cámara infrarroja y procesada por la computadora para después decidir la acción a realizar.

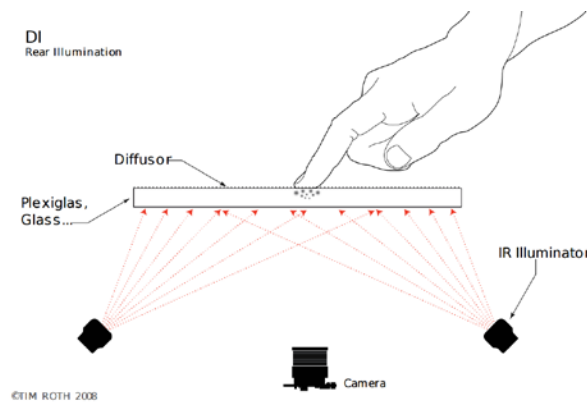


Figura 1 Técnica de Iluminación difusa (DI).

### Reflexión Interna Totalmente Frustrada (Frustrated Total Internal Reflection)

La Reflexión Interna Totalmente Frustrada se basa en la reflexión de la luz infrarroja en el interior de una superficie difusora generalmente acrílico provocando que esta superficie se ilumine uniformemente y completamente. Cuando el usuario toca esta superficie los rayos de luz infrarroja que viajan por dentro y que inciden en este punto son reflejados hacia el otro lado de la superficie (figura 2) donde son

detectados por una cámara infrarroja la cual envía esta información a la computadora para después saber cuándo y dónde se tocó la superficie táctil.

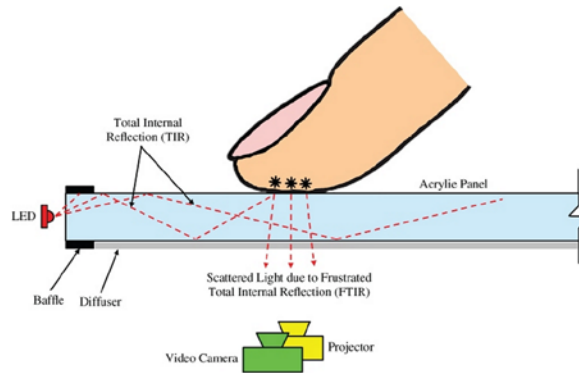


Figura 2 Funcionamiento de reflexión interna total frustrada (FTIR).

### Plano de Luz Láser (Laser Light Plane)

Para esta técnica se utilizan láseres infrarrojos para crear un Plano de Luz Láser de 1mm de grosor por encima de la superficie a tocar, normalmente se colocan de 2 a 4 láseres con longitud de onda de 780nm a 940nm en las esquinas de la superficie para crear el plano de detección.

Cuando esta superficie es tocada, la luz infrarroja se refleja en el dedo u objeto y viaja hacia el otro lado de la superficie donde una cámara infrarroja detecta esta luz (figura 3), luego la computadora procesa esta información para decidir qué acción realizar.

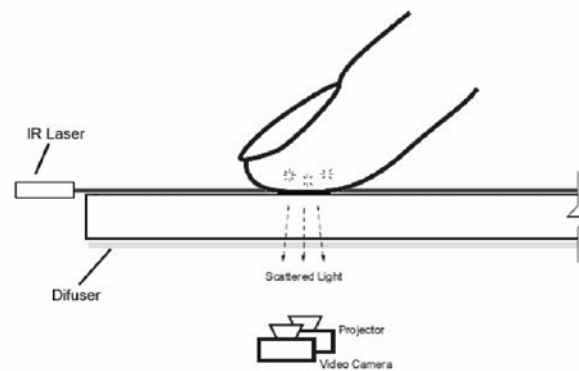


Figura 3 Técnica del Plano de Luz Láser (LLP).

### Malla Infrarroja (Infrared Grid)

En todo el perímetro de un marco (frame) se colocan emisores y receptores infrarrojos, los emisores son colocados en un lado horizontal y en un vertical, los receptores son colocados en contraposición a cada uno de los emisores en los dos lados restantes del marco para formar una matriz de luz infrarroja en su interior.

Cuando un objeto o dedo atraviesa esta matriz los emisores tanto horizontales como verticales dejan de percibir la señal de los emisores correspondientes (figura 4), luego, la computadora procesa estas señales para localizar donde ocurrió el punto de contacto con la superficie.

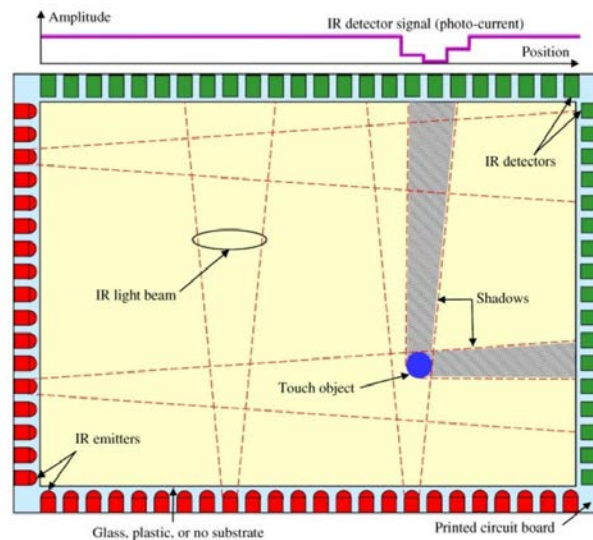


Figura 4 Marco (frame) táctil de luz infrarroja.

### Tecnología de Toque Capacitivo (Capacitive Touch technology)

Esta tecnología se basa principalmente en emplear el cuerpo humano como un conductor eléctrico para la detección de toques sobre una superficie con un campo electrostático.

Generalmente se emplea un método llamado *Capacitancia Mutua (Mutual Capacitance)* que utiliza filas y columnas de un material conductor muy delgado y con 90% de transparencia en toda la superficie táctil que al aplicarles voltaje forman un campo electrostático con capacitancia en sus intersecciones, esto

permite que el sistema de control pueda medir la capacitancia de cada nodo o intersección individualmente para detectar cuando cambia la capacitancia e identificar múltiples puntos de contacto simultáneamente (figura 5).

Cuando un dedo toca la superficie parte de la corriente eléctrica del campo es absorbida por el dedo provocando una reducción en la capacitancia mutua de la intersección, si la reducción de esta capacitancia cruza el umbral de toque (configurado previamente) se considera que existió contacto con la superficie y entonces el controlador localiza la posición de toque.

La capacitancia mutua permite que múltiples dedos, palmas, u objetos capacitivos pueden interactuar con la superficie con mayor precisión al mismo tiempo, estas detecciones pueden ser fáciles de interpretar solo que el número de toques simultáneos está limitado por el tamaño de la superficie táctil y por el diseño del controlador.

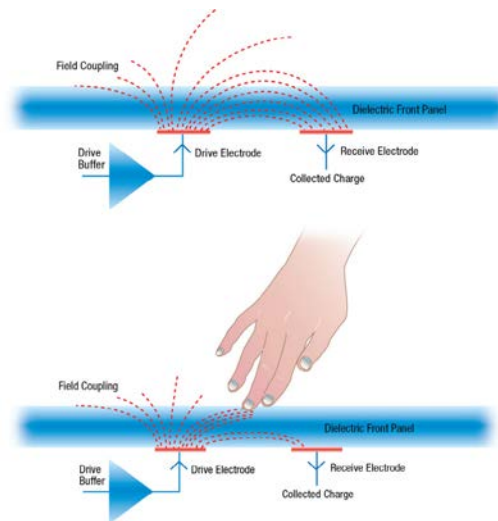


Figura 5 Funcionamiento de capacitancia mutua mutual capacitance.

Por su tecnología, las pantallas capacitivas necesitan ser manejadas mediante el dedo o un objeto que disponga de su capacitancia, no siendo aptas para los apuntadores stylus. Pueden detectar varias pulsaciones simultáneas o gestos, lo que permite diversas formas de actuar con ellas, aumentando su capacidad para ser controladas. Las pulsaciones o gestos no requieren presión, basta con deslizar el dedo para controlar la pantalla del dispositivo.

Al ser utilizadas directamente por el dedo, sin objetos intermedios y no ser necesaria ninguna presión, la experiencia del usuario al manejar este tipo de pantallas es bastante buena. La impresión es de rapidez, de inmediatez, siempre que el sistema operativo y el programa que estemos manejando esté bien diseñado.

Apple con el iPhone y sus tabletas manejan tecnología capacitiva, así como Samsung y LG.

La idea de este trabajo, es desarrollar una superficie interactiva de 32 pulgadas que facilite el trabajo colaborativo con fines educativos.

## 2. Desarrollo

### Mesa interactiva infrarroja

En un inicio se utilizó la técnica multitáctil de Plano de Luz Láser (LLP) como interfaz de una mesa interactiva la cual mostraba el contenido de la computadora por medio de un proyector. Esta técnica utilizaba 4 láseres infrarrojos de 780nm de longitud de onda con 25 mW de potencia, una lente generadora de línea de 89° por cada láser que permite generar un plano de luz infrarrojo sobre la superficie de la mesa, y una cámara con un filtro de luz infrarroja para 780nm (figura 6).

Cuando un objeto tocaba la superficie se creaba una reflexión difusa en el plano infrarrojo lo cual detectaba el sistema como un toque pero se presentaron algunos problemas ya que en ocasiones el sistema detectaba toques inexistentes propiciando que la superficie no funcionara de manera adecuada.



Figura 6 Láseres y su instalación.

### **Mejoras de la mesa infrarroja**

Se pudo observar que estos toques falsos eran provocados por la luz externa tanto natural como artificial por lo que se decidió cambiar los láseres de 780nm a láseres de 850nm para minimizar los problemas con la luz ambiental ya que este tipo de longitud de onda se encuentra más alejado del espectro visible, la cantidad de radiación emitida por los láseres no pone en riesgo la salud de los usuarios de acuerdo a las normas establecidas para realizar esta actividad, y además el cambio de láseres no requería de alguna otra modificación al diseño original de la mesa, solamente se consideró tener un filtro de 850nm en la cámara.

Para asegurar una mejor iluminación de la superficie, se decidió combinar la técnica de LLP con la técnica de FTIR por lo cual se agregaron unas tiras de leds infrarrojos en el borde de la superficie de acrílico para la iluminación interna (figura 7).

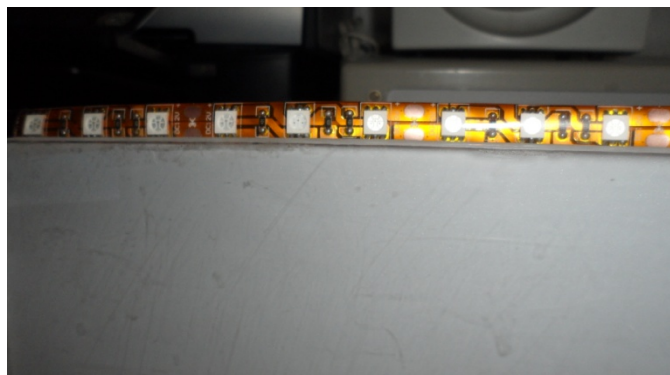


Figura 7 Tira de leds infrarrojos.

Los resultados con las adaptaciones planteadas fueron positivos ya que se lograron borrar los puntos de toque falsos que se tenían en el diseño original y se corrigió el funcionamiento errático del software de aplicación, lo cual se verificó tanto con la luz natural como la artificial. Además, al tener una mayor iluminación infrarroja se mejoró la sensibilidad y la definición de los puntos de contacto.

Posteriormente se realizaron pruebas de aplicación en un aula utilizando esta mesa como herramienta de apoyo didáctico mostrando gran aceptación entre los alumnos y permitiendo que varios integrantes de un grupo trabajen de forma simultánea (figura 8). Aunque las pruebas realizadas fueron con niños esta

herramienta puede ser utilizada por personas de cualquier edad ya que su objetivo es mejorar los procesos de enseñanza-aprendizaje y promover el trabajo colaborativo entre los usuarios.

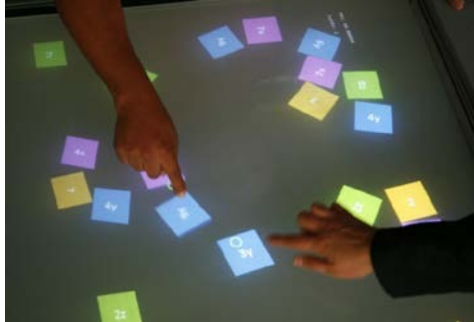


Figura 8 Aplicación para la enseñanza de álgebra.

## Frames

Ya que los resultados obtenidos con la mesa interactiva fueron favorecedores se decidió ampliar su campo con un frame adaptable a diferentes tamaños para generar superficies multitáctiles que permitiera la interacción de los usuarios con un entorno computacional a través de pantallas de tecnología LCD, LED o plasma. El diseño del frame se basó principalmente en dispositivos electrónicos adaptables entre sí que permitieran generar superficies multitáctiles de diferentes tamaños, que tuvieran conexión USB, y que pudieran trabajar con un sistema operativo como Windows por su popularidad y familiarización con la población (figura 9).

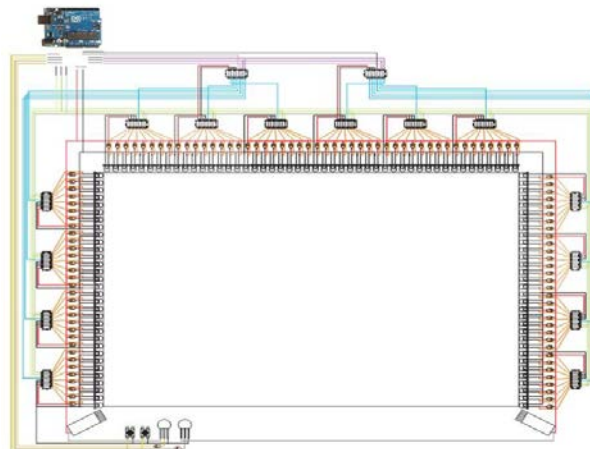


Figura 9 Esquema del marco multitáctil.

Para este frame se utilizaron dos láseres infrarrojos en las esquinas inferiores de la superficie táctil y cada uno con una lente de apertura de 120° las cuales expanden un haz infrarrojo formando un plano que cubre la pantalla, cada láser es alimentado por un transistor que a su vez está controlado por una placa de Arduino.

El Arduino es el controlador de la interfaz ya que está conectado por USB directamente a la PC, alimenta a todo el circuito eléctrico, tiene el botón de arranque, manda encender los láseres para su alineación correcta, y envía señales para controlar los multiplexores de los módulos tanto los de control como los de recepción.

Los módulos de recepción se colocaron a lo largo del borde de los lados laterales y el lado superior de la superficie táctil, cada uno de estos módulos contiene ocho fotodiodos y un multiplexor, los fotodiodos perciben la luz infrarroja y emiten variaciones de voltaje si existe algún cambio en la luz, mientras que los multiplexores registran y transmiten estos cambios de voltaje a los módulos de control para que se pueda censar toda el área táctil sin que se traslapen las señales.

Cada uno de los módulos de control contiene un multiplexor secundario el cual le da corrimiento de censado a los multiplexores primarios que se encuentran conectados a cada una de las salidas del secundario, teniendo como resultado que se habilite solo uno de los multiplexores primarios y así determinar de manera más precisa la coordenada del toque. Finalmente, los multiplexores secundarios son conectados al Arduino el cual, según la programación, habilita cada uno permitiendo captar si se realizó un toque dentro del área derecha o el área izquierda.

Los módulos recepción son de aproximadamente 70 mm de largo por 20 mm de ancho y un grosor no mayor a 10 mm, todos los módulos se diseñaron en una placa fenólica de doble capa para optimizar el área de conducción y se utilizaron los programas Livewire y PCB Wizard para el diseño del circuito impreso.

Posteriormente se adquirió un frame infrarrojo que está constituido por emisores y receptores que forman una matriz infrarroja para la detección táctil, no es afectado



por la luz ambiental, se instala de forma sencilla, y posee un controlador de computadora tanto para sistemas operativos Windows como sistemas basados en Linux que solo requieren calibrar el dispositivo durante la configuración a diferencia del frame adaptable que se tenían que calibrar los láseres cada vez que se encendía el sistema. El diseño de esta mesa interactiva se implementó con el frame infrarrojo sobre una pantalla LCD y enmarcado con acrílico, por debajo de ésta se encuentra un compartimiento con una laptop como unidad central de procesamiento y con las conexiones requeridas, además la altura de la mesa se puede ajustar (figura 10).

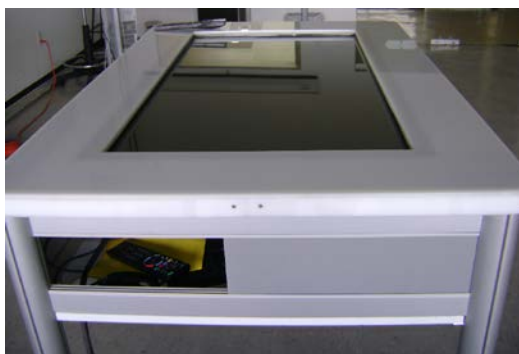


Figura 10 Mesa interactiva con frame infrarrojo.

### **Touch Foil**

Actualmente se tiene una película capacitiva multitáctil o “Touch Foil” que se adquirió con el objetivo de integrar esta tecnología en laboratorios, buscando mejoras en la calidad de la mesa infrarroja ya que carece de protección contra líquidos. Una película capacitiva es un sensor táctil, delgado, transparente y flexible que funciona sobre superficies no metálicas como la madera, el plástico o el vidrio, normalmente es utilizado en conjunto con una pantalla o un proyector y una computadora para crear superficies interactivas (figura 11).

Lo primero que se realizó fue el montaje de la interfaz multitáctil (figura 12), para esto se puso un vidrio de 6mm de grosor sobre un televisor LED de 32”, encima de este vidrio se colocó la película capacitiva y arriba de ésta otro vidrio de 6mm.



Figura 11 Película capacitiva.



Figura 12 Montaje de la interfaz.

Posteriormente se realizó una caracterización de la película capacitiva para definir y corroborar los datos proporcionados por el proveedor, en la que se describe el tipo de superficie, tecnología que usa, fabricante, instalación, dimensiones, método de detección, compatibilidad de software, condiciones de trabajo, características y principio de funcionamiento.

Luego se realizaron mediciones con una cinta métrica para saber las dimensiones de la película capacitiva, el controlador y el cable (figura 13), también se utilizó para saber el rango de error de los toques realizados en la pantalla una vez configurada con la computadora.

Después se realizó la conexión de los elementos que constituyen el sistema interactivo multitáctil, comenzando con la película capacitiva que tiene un cable USB y un controlador, este último se encarga de hacer el proceso de conversión de datos y los envía por medio del cable USB para que el puerto de la

computadora reconozca el dispositivo de entrada táctil sin necesidad de utilizar otro programa para su control.

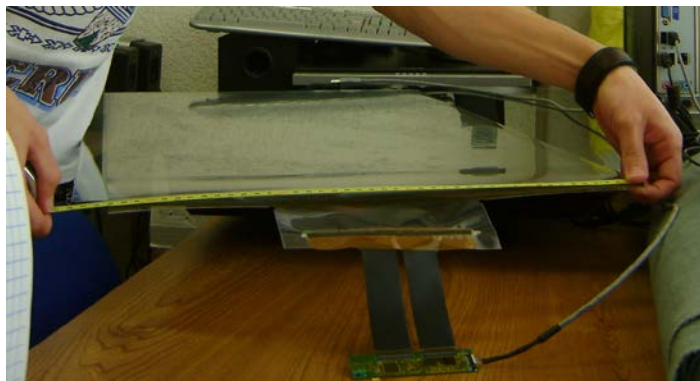


Figura 13 Mediciones.

La película capacitiva contiene dos membranas de salida las cuales se conectaron al controlador verificando que las terminales hicieran contacto del lado correcto en las entradas de este mismo (figura 14), luego se utilizó el cable USB para conectar un extremo a la computadora y el otro extremo (de 10 pines) al controlador, checando cual era el lado correcto de conexión.

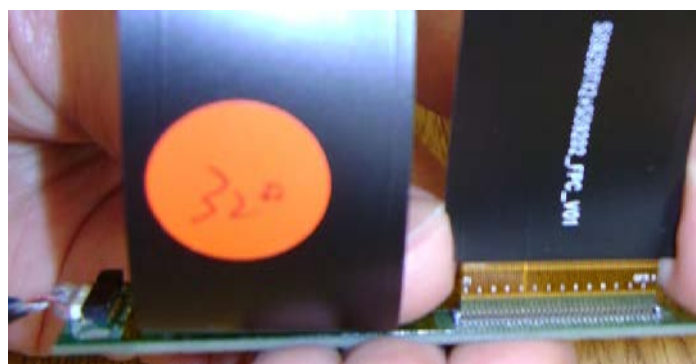


Figura 14 Conexión correcta de las membranas de la película capacitiva.

Cuando se conectó la película capacitiva al puerto USB de la computadora con sistema operativo Windows, el sistema operativo la reconoció como un dispositivo de entrada permitiendo la interacción táctil con este mismo sin necesidad de utilizar el mouse, posteriormente realizó la búsqueda e instalación de un

controlador (driver) adecuado para el correcto funcionamiento y calibración de la película, al terminar la instalación, nos proporcionó un icono el cual expande un teclado virtual en la pantalla para que finalmente se puedan realizar funciones de teclado además de las funciones de mouse, zoom in, zoom out, rotar y multitoque de hasta 10 puntos simultáneos.

En el caso de Windows 8 y 10, el icono del teclado virtual se encuentra en la barra de tareas (figura 15), y en Windows 7 aparece una pestaña en la parte izquierda del escritorio la cual abre el teclado (figura 16). Este teclado también proporciona una entrada de escritura manual, es decir, permite escribir como si el dedo fuera un lápiz y así como se van realizando los movimientos de cada letra el sistema operativo coloca la posible letra de lo que se está escribiendo.

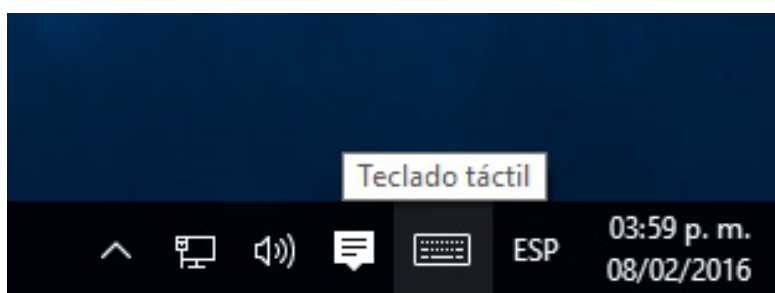


Figura 15 Icono del teclado virtual en la barra de tareas.



Figura 16 Teclado virtual.

La calibración se realizó de forma sencilla, primero se abrió el panel de control, luego seleccionó “hardware y sonido”, después se hizo clic en “configuración de Tablet PC” (figura 17), en esta ventana se hizo clic en “Configurar...” lo cual abrió

una aplicación que pidió tocar la película para identificar a la pantalla como táctil, finalmente se hizo clic en “Calibrar...” y la herramienta abrió una ventana (ver figura 18) donde se solicitó tocar todas las cruces que salieron en la pantalla para hacer la calibración de la película.

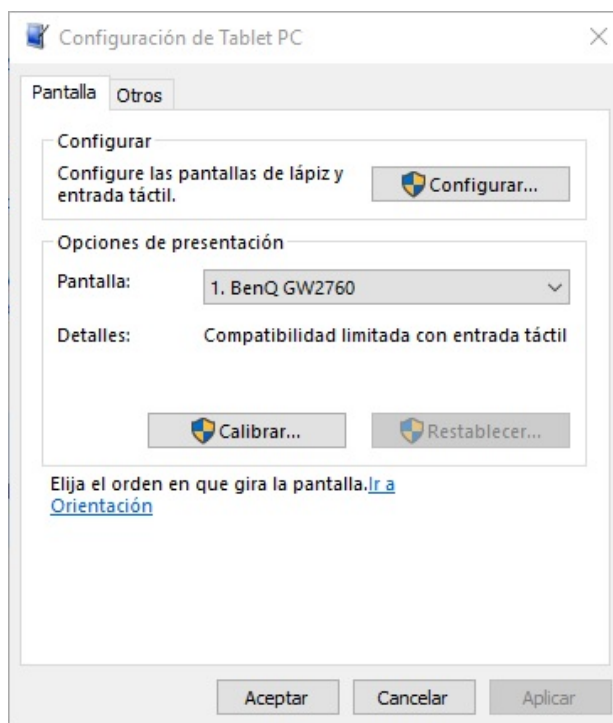


Figura 17 Ventana de Configuración de Tablet PC.

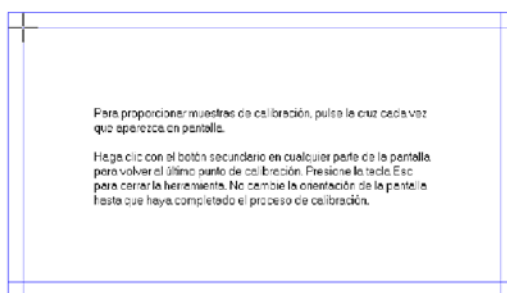


Figura 18 Aplicación para calibrar la película capacitiva.

Para definir la calidad del funcionamiento de la película capacitiva como la precisión de toque, se realizaron diferentes toques tanto simples como simultáneos sobre la superficie multitáctil y se observaron las distancias entre el

toque y punto mostrado en la pantalla. La sensibilidad se probó con diferentes presiones de toque, y la calibración se realizó mediante software, el cual solo pide colocar el dedo en puntos específicos del área táctil.

Para las características de funcionamiento y condiciones de trabajo se realizaron pruebas tocando la superficie a través de objetos hechos de distintos materiales como tela, metal, vidrio y grafito, éstos se usaron para determinar con cuales la detección táctil era posible (figura 19); así como toques con las manos de forma directa colocando la película capacitiva sobre materiales como madera, plástico y vidrio como superficies de apoyo para verificar que estos materiales no afectaran la funcionalidad de la película; también se colocó polvo y agua sobre su superficie para demostrar que estos agentes externos no afectan la detección de las manos.



Figura 19 Prueba de toques simultáneos y a través de tela.

Finalmente teniendo el sistema conectado, configurado y calibrado, se probaron algunas de las aplicaciones y programas que normalmente contiene una computadora, como el navegador web, visualizador de imágenes, reproductor de audio y video, procesador de textos, entre otros, dando como resultado un excelente funcionamiento del sistema.

### **3. Resultados**

Las pruebas realizadas con la mesa interactiva de iluminación infrarroja dieron buenos resultados y aunque con las adaptaciones que se hicieron se redujo la interferencia de la luz ambiental, no se eliminó en un 100%.

El frame adaptable se diseñó como base de futuros desarrollos tanto de software como hardware ya que se utilizaron componentes de fácil acceso, bajo costo y, en el caso de Arduino, de código abierto.

La idea principal de utilizar varios módulos es para que el frame se pueda montar a cualquier tipo de pantalla sin necesidad de modificar alguno de los dispositivos, solo se tienen que agregar y conectar unos a otros para abarcar un área diferente, es por eso que estos módulos se diseñaron con interconexiones en los extremos. Si se llegará a requerir un área bastante grande y se conectaran demasiados módulos como para que la alimentación del Arduino no sea suficiente para el circuito, solo se tendría que alimentar con una fuente externa.

La película capacitiva mostró una excelente compatibilidad tanto para los sistemas operativos como para las computadoras empleadas pudiéndose calibrar con el software del sistema operativo, y aunque se intentó calibrar con el software del fabricante no se pudo calibrar la película ya que éste no realizó cambios ni en los límites del área táctil ni en la sensibilidad, tampoco se visualizó la tasa de muestreo táctil y falló el ajuste automático.

Los resultados obtenidos en las pruebas de la caracterización estuvieron dentro del rango de valores establecidos por el fabricante ya que la película funcionó de manera adecuada, además, las aplicaciones y programas probados tuvieron un excelente funcionamiento.

Sustituyendo el frame infrarrojo por la película capacitiva se reduce el grosor de la mesa interactiva ya que la matriz infrarroja requiere de ser interceptada en su interior para la detección de toques en la superficie y la película capacitiva solo requiere de toques superficiales, también permite tener un vidrio de protección en la parte superior para evitar que algún líquido derramado pueda ocasionar un problema en el circuito ya que el vidrio no afecta ni su funcionamiento ni la claridad de la imagen.

#### **4. Conclusiones**

Las películas capacitivas tienen una gran versatilidad en cuanto aplicaciones ya que es un dispositivo delgado, transparente, ligero, flexible, resistente a agentes



externos, no es afectado por la luz exterior, su instalación puede ser temporal o permanente y tienen una buena interactividad a través de guantes.

Con el desarrollo actual de las mesas interactivas multitoque se ha podido demostrar que tienen gran aceptación por parte de los usuarios, facilitan el trabajo en equipo, promueven la participación, benefician los procesos de enseñanza-aprendizaje, y además, al descentralizar el control del dispositivo se trabaja de una forma más activa y permite que todos los integrantes participen simultáneamente.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] J. Schöning, P. Brandl, F. Daiber , F. Echtler, O. Hilliges, J. Hook, M. Löchtefeld, N. Motamedi, L. Muller, P. Olivier, T. Roth, U. von Zadow, Multi-Touch Surfaces: A Technical Guide. 2008. Institute for Geoinformatics University of Münster. Münster, Germany.
- [2] K. Bhowmik, Interactive Displays: Natural Human-Interface Technologies. 2014. John Wiley & Sons. United States of America.
- [3] NUI Group Authors, Multi-Touch Technologies. NUI Group. 2009.
- [4] 3M, Touch Technology Brief: Projected Capacitive Technology. 3M. United States of America. 2013.
- [5] J. Ramírez, F. Gamboa, A. L. Eslava, O. Sánchez, P. López y I. Quintanilla, Optimización de Diseño de Mesas Interactivas Multitouch. México, D.F. 2012.
- [6] J. Ramírez, F. Gamboa y G. de la Cruz, Diseño de Marco Adaptable para Generación de Superficies Multitoque. México, D.F. 2015.

## **6. Autores**

Mtro. Jesús Ramírez Ortega es Ingeniero Mecánico Electricista, egresado de la Facultad de Ingeniería UNAM y graduado en el año de 1986. Maestro en Pedagogía por la Facultad de Filosofía y Letras de la UNAM. Fue jefe de la Sección de Mantenimiento de Cómputo del Centro de Instrumentos (1988-1991). Jefe del Departamento de Mantenimiento del Centro de Instrumentos UNAM (1991-1999). Jefe de la Sección de Capacitación del Centro de Ciencias Aplicadas



y Desarrollo Tecnológico (1999-2004). Secretario Técnico del CCADET (2006 a la fecha). Profesor de la Facultad de Ingeniería en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (1987 a la fecha). Desde 2001 formó parte del Laboratorio de Interacción Humano Máquina y Multimedia del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, hasta que este laboratorio se transformó en el Grupo de Espacios y Sistemas Interactivos para la Educación. En 1998, inició como gestor en la creación de Opciones Técnicas en mantenimiento a equipo de cómputo, electrónico y de refrigeración, para la formación de técnicos especializados en el CCH. En el Grupo de Espacios y Sistemas Interactivos para la Educación, ha participado en el desarrollo de diversos productos: Geomesa (para la enseñanza de las matemáticas), interactivos con interfaces de dimensión humana para museos (Museo de la Rodadora en Cd. Juárez y el Papalote en Monterrey), generación de superficies interactivas multitoque mediante iluminación infrarroja, entre otros. Participó en la innovación de laboratorios para la enseñanza de las ciencias a nivel bachillerato en el que se han generado más de 100 laboratorios distribuidos en los 14 planteles de bachillerato de la UNAM. (2009-20013). Por otra parte, ha participado como consultor para la definición del modelo de los Centros México Conectado, impulsados por el Gobierno de la República (2014) y el análisis de uso de tabletas electrónicas en quinto año del nivel básico (SEP, 2014) y, adicionalmente, participó en la inserción de uso de tabletas electrónicas en la ENP definiendo estrategias, formación de docentes y aplicaciones pertinentes. (2013- 2014). Ha impartido diversos cursos especializados en formación de docentes y técnicos Ha fungido como director varios proyectos de tesis a nivel licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica y Computación. Facultad de Ingeniería UNAM. Ha organizado los congresos de instrumentación de la SOMI (2006 – 2009, 2012 y 2014), así como los correspondientes internacionales denominados ICIAS y CIICA (2010, 2011 y 2013). Miembro del Consejo Interno del Centro de Instrumentos (1991-2001 y 2006-2008). Es representante del CCADET en la Red de Educación Continua (2001-2014). Miembro de la Comisión Mixta Permanente de Capacitación y Adiestramiento del CCADET UNAM. a partir

del 20 de julio de 2001. Miembro de la Comisión Local de Seguridad del CCADET UNAM.

Jorge de Jesús Hernández Vega es el actual tesista del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. Terminó sus estudios de la carrera Ingeniería Mecánica Eléctrica (2010-2015) en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Realizó su servicio social en el Grupo de Espacios y Sistemas Interactivos para la Educación realizando pruebas e investigaciones acerca de superficies interactivas multitáctiles y apoyó en la edición de la revista SOMI XXX.

# **PLAN-EA: GESTIÓN VÍA WEB DE PLANEACIONES ACADÉMICAS CONSIDERANDO ESTRATEGIAS DOCENTES, RECURSOS EDUCATIVOS Y ESTILOS DE APRENDIZAJE**

***Aurelio Nicolás Mata***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa  
*aurelionicolas930728@gmail.com*

***Reyna Carolina Medina Ramírez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa  
*cmed@xanum.uam.mx*

***Fausto Casco Sánchez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa  
*alfa@xanum.uam.mx*

## **Resumen**

El presente trabajo tiene por objetivo describir una aplicación web para la generación de planeaciones detalladas del contenido de un curso considerando modalidad de conducción, estrategias docentes, recursos educativos y estilos de aprendizaje. La propuesta se apoya en el enfoque eXtensible Markup Language. Se enfatiza en la caracterización del programa operativo de una Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA), así como en los recursos educativos asociados. Como resultado se presenta la arquitectura de la aplicación web Plan-EA. Se concluye que la aplicación en etapa de pruebas puede facilitar la reutilización efectiva de recursos educativos, motivar el trabajo colegiado y agilizar la incorporación de nuevos profesores a la actividad docente.

**Palabra(s) Clave(s):** Estilos de aprendizaje, estrategias docentes, modalidad de conducción, planeación académica detallada, recursos educativos, XML.

## **1. Introducción**

La Universidad Autónoma Metropolitana es una institución de educación pública fundada en 1974 con el objetivo de ofrecer programas de licenciatura y posgrado ligados al entorno social. Ha mantenido una constante investigación y reinención de la educación superior. Bajo esta última, los docentes, imparten cursos tanto en sus programas de estudio y Unidades como para otros posgrados en modalidades presenciales o híbridas (blended learning) a través de plataformas específicas de video-conferencia, sistemas de gestión de aprendizaje (Moodle o Blackboard), así como, tecnologías de la familia Google por mencionar algunas. Partiendo de la premisa de que las TIC son facilitadores para el acceso inmediato a la información, es necesario proponer buenas prácticas educativas que favorezcan el aprendizaje pertinente y descubrir estrategias organizativas y metodológicas convenientes en la Universidad para responder a los cambios que espera la sociedad del contexto universitario. Por otro lado, los docentes buscan constantemente estrategias didácticas que les permitan mantener la calidad de sus programas educativos y favorecer el aprendizaje en los estudiantes [1,4]. Por lo general, identifican las preferencias de aprendizaje de sus discentes, a través de cuestionarios: CHAEA, Kolb, Hemisferios cerebrales de Hermann y Vak [2,3]. Los cuales son útiles al momento de adecuar sobre la marcha el curso que se imparte para seleccionar los recursos educativos y estrategias docentes atendiendo al tipo de población de la cual se dispone. En la academia existen esfuerzos para desarrollar aplicaciones encaminadas a genera material educativo considerando los estilos de aprendizaje [5,6,7,8]. Sin embargo, herramientas que permitan construir guías didácticas (modelo instruccional, modelo operacional de un curso) son limitadas [8]. Contar con planeaciones detalladas por un lado, constituyen una memoria educativa que puede ser valorada y actualizable a los cambios en los planes de estudio que se presenten. Por otro lado, las experiencias que cada docente obtiene durante un curso deben ser capitalizadas en apoyo a los nuevos profesores, es decir, lo que ha funcionado a nivel de material educativo en un curso puede servir a otros con las respectivas adecuaciones [7,8]. El escenario ideal sería que teniendo una base de planeaciones detalladas (por

temas, subtemas, modalidad de conducción, estrategias docentes a utilizar vinculadas con los recursos educativos en función de los estilos de aprendizaje de los estudiantes en curso) cualquier profesor con la formación teórica que requiere el curso podría impartirlo dado que parte de una guía detallada, material educativo ad hoc, así como recomendaciones de impartición a manera de buenas prácticas. Tanto las planeaciones detalladas como los recursos educativos podrían integrarse a los materiales disponibles en los repositorios institucionales cuya finalidad es favorecer el intercambio y reutilización de recursos educativos entre instituciones [9]. En la web podemos encontrar gran diversidad de recursos educativos (videos, reportes, enlaces web, etc.) que apoyan a la enseñanza de algún tema específico. Por otro lado, los profesores crean sus propios recursos educativos producto de fuente propia o vinculando material obtenido de la Web. Dicho material es reutilizado o actualizado trimestre a trimestre por el propio profesor o colegas que imparten o van a impartir dicha Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA). Es en este último donde el contar por un lado, con una planeación del curso, así como una base de recursos educativos caracterizados por estilo de aprendizaje (indicando porcentaje y estrategias docentes asociadas), constituyen un apoyo invaluable para los profesores que van a impartir por primera vez un curso. Cabe mencionar que se considera como recurso educativo a cualquier material audio-visual que pueda contribuir a reforzar la adquisición de conocimiento en el educando. Presentaciones de temas desarrollados, ejercicios, prácticas, ejemplos y tareas, son solo algunos de los recursos educativos que pueden incluirse en una planeación. La caracterización de una planeación académica de forma detallada, así como de los recursos educativos en función de los estilos de aprendizaje y estrategias didácticas es el objetivo de este trabajo. Por otro lado, el estilo de aprendizaje que fue adoptado en este trabajo por los autores fue el CHAEA de Honey-Alonso [3]. El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la Sección 2, se definen los conceptos educativos a utilizar en este artículo enfatizando en los metadatos que los componen. La Sección 3, describe la aplicación web para la generación de planeaciones detalladas considerando recursos educativos y estilos de aprendizaje asociados (Plan-EA).

En particular, se describe el módulo de planeación de una UEA y el módulo para el registro y búsqueda de recursos educativos a ser incorporados en la planeación. Finalmente, en la Sección 4 se presentan la conclusión y trabajo futuro.

## **2. Conceptos educativos**

En esta sección se describen los conceptos de planeación detallada, recursos educativos, modalidad de conducción, estrategia docente o didáctica, así como, estilos de aprendizaje. En la UAM-Iztapalapa la impartición de una Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA) en la modalidad presencial involucra la organización de la misma a través de una planeación (programa operacional) [10]. En la división de Ciencias Básicas e Ingeniería (CBI) se tiene un manual de modalidades de conducción de las unidades de enseñanza-aprendizaje en este se especifican las características de las modalidades de conducción así como que estrategias docentes están asociadas a cada modalidad [10]. Por lo general una planeación está conformada por:

- Datos generales: clave y nombre de la UEA, grupo, periodo de impartición (trimestre), profesor que la imparte (nombre, oficina, página web, horario y lugar de asesorías), horario de teoría y práctica (lugar y horas), aula virtual asignada a la UEA para el intercambio de información entre alumnos y profesor.
- Objetivos de la UEA.
- Contenido sintético (temas, subtemas, tiempo destinado a cada tema en semanas).
- Modalidad de conducción (dinámica a seguir para la enseñanza-aprendizaje).
- Estrategias docentes.
- Modalidad de evaluación (número de actividades a evaluar con porcentajes y criterios de evaluación), equivalencias entre el promedio obtenido y la calificación final. En algunas instituciones las calificaciones son con letras (NA, S, B, MB) que equivalen a un rango establecido.
- Buenas prácticas y finalmente.
- La bibliografía.

En una planeación podemos asociar a temas o subtemas una modalidad de conducción, estrategias docentes (actividades), así como recursos educativos específicos como: ejemplos, ejercicios, prácticas de laboratorio, lecturas adicionales por mencionar algunos. El disponer de herramientas (vía web) que faciliten por un lado la estandarización de la planeación de un curso (contenido, modalidad de conducción, estrategias docentes, recursos educativos asociados considerando estilos de aprendizaje), motivaría no solo el trabajo colaborativo entre profesores, sino también, la rotación de carga académica dado que se dispondría del material correspondiente para impartirlo y tomaría en cuenta el aprendizaje de los alumnos, activo, reflexivo, teórico y pragmático [3], quedando atrás la problemática que el profesor imponía el proceso de aprendizaje según su criterio o dependiendo su estilo de aprendizaje. En este proyecto se tomó como caso de estudio la UEA Temas Selectos de Bases de Datos, asignatura impartida en la Licenciatura en Computación de la UAM-Iztapalapa. La planeación así como los recursos educativos asociados son definidos formalmente a través de un enfoque XML (estructura, significado y visualización). XML (eXtensible Markup Language) es un lenguaje de etiquetas propuesto por el consorcio del web (W3C) que permite asociar significado a los datos que son almacenados entre éstas. Originalmente, fue propuesto para el intercambio de datos en formato estándar, hoy en día podemos ver su versatilidad en: la facturación electrónica, el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles, la gestión de datos (acuñándose el término de bases de datos XML) [13,14]. Una de las ventajas de este lenguaje es que los datos y el formato están separados. Por otro lado, se puede definir una estructura que sirva de referencia para validar archivos XML, facilitando su intercambio y manipulación. A dicha estructura se le conoce como esquema XSD (XML Schema Definition). Por las características mencionadas, se propuso un esquema XSD para definir la estructura y caracterización de los elementos que conforman una planeación, así como uno para los recursos educativos. En un esquema XSD, se especifican los tipos de datos y restricciones a nivel de repeticiones de los elementos que la conforman, por ejemplo un curso puede ser

impartido a lo más por dos profesores, un curso debe de tener por lo menos dos horas de asesoría a la semana.

“Un recurso educativo es cualquier material que, en un contexto educativo determinado, es utilizado con una finalidad didáctica o para facilitar el desarrollo de las actividades formativas” [11]. Por otro lado, la explicación de conceptos teóricos están disponible en diferentes fuentes como: libros, videos, presentaciones digitales, tutoriales, blogs por mencionar algunos. Es en este punto donde el profesor puede utilizar material vistoso previamente desarrollado para la teoría en lugar de rehacerlo. Lo interesante es el personalizar o enriquecer el curso con recursos educativos y estrategias docentes de profesores que hayan sido validadas previamente.

Una modalidad de conducción describe el modo principal que se utilizará durante el curso (tabla 1). Las estrategias docentes o didácticas se refieren a los lineamientos y dinámicas de trabajo que el docente considera para aplicarlos en un curso y que deben empatar con los objetivos de la UEA y apegados a la modalidad señalada [10].

Tabla 1 Relación entre modalidad de conducción y estrategias docentes asociadas [10].

Modalidad de Conducción	Estrategias Docentes
Asesoría individualizada	Aprendizaje basado en problemas, aprendizaje orientado a proyectos, discusión, Trabajo colaborativo, Reportes escritos
Conferencia	Debate, exposición, lectura dirigida
Estancia profesional	Aprendizaje basado en problemas, discusión, exposición, lectura dirigida, trabajo colaborativo y reportes escritos
Estudio de casos	Aprendizaje basado en problemas, aprendizaje orientado a proyectos, debate, discusión, lectura dirigida, trabajo colaborativo y reportes escritos
Laboratorio	Aprendizaje basado en problemas, discusión, experimentos, exposición, trabajo colaborativo, reportes escritos
Proyecto	Aprendizaje orientado a proyectos, exposición, trabajo colaborativo y reportes escritos
Seminario	Aprendizaje basado en problemas, discusión, exposición, lectura dirigida, trabajo colaborativo y reportes escritos
Taller	Aprendizaje basado en problemas, demostraciones, lectura dirigida, trabajo colaborativo y reportes escritos
Trabajo de campo	Aprendizaje orientado a proyectos, discusión, trabajo colaborativo y reportes escritos
Trabajo de gabinete	Experimentos, lectura dirigida, trabajo colaborativo y reportes escritos
Visita profesional	Aprendizaje basado en problemas, Aprendizaje orientado a proyectos, exposición, trabajo colaborativo y reportes escritos



Finalmente, los estilos de aprendizaje (EA), tienen que ver con la manera en que un estudiante o profesor percibe, procesa y almacena información con el fin de construir conocimiento persistente [12]. Se debe de identificar un estilo de aprendizaje tanto para los docentes, como para los discentes [3,16]. En este trabajo se adoptó el estilo de aprendizaje de Honey-Alonso, considerándose 4 estilos de aprendizaje: Activo, Reflexivo, Teórico y pragmático. Los cuales se describen brevemente a continuación [15]. Los alumnos activos se involucran totalmente y sin prejuicios en las experiencias nuevas. Disfrutan el momento presente y se dejan llevar por los acontecimientos. Suelen ser entusiastas ante lo nuevo y tienden a actuar primero y pensar después en las consecuencias. Los alumnos reflexivos tienden a adoptar la postura de un observador que analiza sus experiencias desde muchas perspectivas distintas. Recogen datos y los analizan detalladamente antes de llegar a una conclusión. Los alumnos teóricos adaptan e integran las observaciones que realizan en teorías complejas y bien fundamentadas lógicamente. Piensan de forma secuencial y paso a paso, integrando hechos dispares en teorías coherentes. Finalmente, los alumnos pragmáticos gustan de probar ideas, teorías y técnicas nuevas, y comprobar si funcionan en la práctica. Buscan poner en práctica sus ideas de forma inmediata. La siguiente sección describe la aplicación Plan-EA, en particular la metodología empleada para su desarrollo, la arquitectura, así como los criterios de evaluación y resultados preliminares.

### **3. Aplicación web Plan-EA**

Plan-EA (Planeación detallada considerando estrategias docentes, recursos educativos y Estilos de Aprendizaje) es una aplicación web desarrollada para la generación de planeaciones académicas detalladas de un curso vinculando a cada subtema la modalidad de conducción, las estrategias docentes (ED) asociadas, así como los recursos educativos digitales que apoyan a dichas estrategias y que consideran estilos de aprendizaje (activo, reflexivo, teórico y pragmático). Plan-EA permite la gestión de planeaciones detalladas, así como la administración de una base de recursos educativos, ambos con enfoque XML.

## **Metodología**

La metodología que se siguió para desarrollar la aplicación Plan-EA consta de 8 pasos:

- Revisión de modelos para caracterizar estilos de aprendizaje.
- Estudio de tecnologías web: XML, XSD, php etc.
- Diseñar diagramas XML (árboles XML) para las estructuras de una planeación y recursos educativos, indicando las restricciones para los elementos y atributos correspondientes.
- Crear esquema XSD para la planeación y recursos educativos.
- Crear archivos XML (planeación y recursos educativos) a partir de los esquemas XSD propuestos.
- Proponer la arquitectura web para la aplicación Plan-EA.
- Formalizar los casos de uso de Plan-EA.
- Desarrollar la aplicación Plan-EA:
  - ✓ Módulo para gestionar planeaciones académicas considerando modalidad de conducción, estrategia docente, recursos educativos y estilo de aprendizaje.
  - ✓ Módulo para gestionar recursos educativos.

## **Arquitectura**

La arquitectura de Plan-EA es en capas: Datos, Negocio e Interfaz. La figura 1 muestra las capas de la arquitectura propuesta, las cuales se describen a brevemente:

- Capa Interfaz: Su deber es ser amigable para el usuario, solo mostrar la información que necesite y sea de su comprensión, así como establecer comunicación con la capa de negocio mandando los datos que le proporcione el usuario.
- Capa Negocio: Recibe los datos que le envía la capa de Interfaz; En esta capa es donde se definen las reglas que se deben de cumplir para una ejecución correcta del programa, valida que los datos sean correctos.

- **Capa Datos:** Recibe los datos que le proporciona la capa de Negocio; ésta capa es la encargada de la interacción con la base datos XML, haciendo consultas, modificaciones, agregar o eliminar datos; esta capa contiene las clases de identidad.

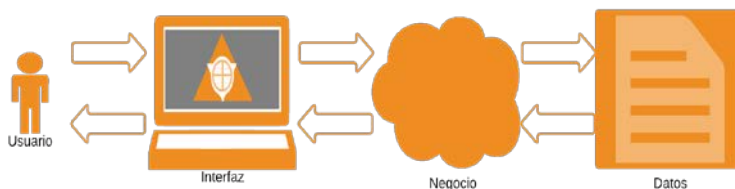


Figura 1 Arquitectura en capas de Plan-EA. [15]

En el desarrollo de Plan-EA se consideraron como funciones para la planeación académica detallada: crear, modificar, consultar y visualizar planeaciones. De manera similar, para los recursos educativos (RE): alta de RE, consultar RE y agregar RE a una planeación. Por razones de espacio, la tabla 2 describe brevemente los siete casos de uso considerados en Plan-EA. La figura 2, muestra la formalidad del caso de uso 1. De manera similar se formalizan los 6 casos de uso restantes [15].

Tabla 2 Casos de uso de Plan-EA.

Id	Proceso de negocio	Descripción del objetivo	Salida esperada
CU-1	Crear Planeación	El sistema muestra página "Crea Planeación"	El sistema muestra mensaje de planeación guardada con éxito.
CU-2	Consultar planeación	El sistema muestra página "Consulta planeación"	El sistema muestra las coincidencias con lo solicitado.
CU-3	Vista de Planeación	El sistema muestra página "Vista planeación"	El sistema muestra la planeación seleccionada.
CU-4	Modifica planeación	El sistema muestra página "modifica planeación"	El sistema muestra una página similar a la de crear una planeación con los campos prellenado con la información de la planeación a modificar
CU-5	Alta de recurso educativo	El sistema muestra página "Crea recurso educativo"	El sistema muestra mensaje de recurso guardado con éxito.
CU-6	Consultar recurso educativo	El sistema muestra página "Consulta recurso educativo"	El sistema muestra las coincidencias con lo solicitado.
CU-7	Agregar recurso educativo a planeación académica	El sistema asocia un recurso educativo a un subtema de la planeación académica, mediante el botón "Agrega recurso"	El sistema asocia el recurso con el subtema.

PROYECTO: Plan-EA FECHA: 2016 Marzo 30  
 AUTOR: Aurelio Nicolás CLAVE: CU 01

	NIVEL
	Resumen muy general
	Resumen
X	Actividad de Usuario
	Detalle

	ALCANCE
X	Organización (caja negra)
	Organización (caja blanca)
	Módulo
	Método

**DESCRIPCIÓN BREVE**

Esta transacción sirve para guardar en la base de datos una planeación.

**ACTORES**

Actor Principal	Sistema de crear planeación.
Actores Secundarios	

**EVENTOS QUE LO INICIAN**

1	El usuario solicita crear un planeación
---	---

**FLUJO DE EVENTOS PRIMARIO**

Sec	Quién	Descripción de la acción
1	Usuario	Solicita crear una planeación
2	Sistema	Muestra página para crear una planeación
3	Usuario	Llena los campos
4	Usuario	Da clic en generar planeación
5	Sistema	Guarda planeación
6	Sistema	Muestra mensaje
7	Fin	

**FLUJO DE EVENTOS ALTERNATIVOS**

A1	Origen 4
	Condición: Usuario no ha completado todos los campos requeridos
	1. Sistema muestra campos faltantes por llenar.
	2. Fin de flujo y se retoma paso 3.

**PRECONDICIONES**

**POSCONDICIONES**

1	Se guarda correctamente la planeación
2	Se actualiza índice de planeaciones

Figura 2 Caso de Uso Crea Planeación (CU-01). [15]

Las tablas 3 y 4 presentan respectivamente un ejemplo de caracterización (XML) de un RE, así como un fragmento de código de Plan-EA correspondiente al esquema conceptual en sintaxis de DTD para un recurso educativo. En particular se definen los elementos: datosGeneralesRecurso, campoDeConocimiento, acceso, sugerenciaEstiloAprendizaje, modalidadConduccion, autorRecurso y resumen.

Tabla 3 DTD Recursos educativos.

<pre> &lt;!ELEMENT recursos (recurso+)&gt; &lt;!ELEMENT recurso (datosGeneralesRecurso,campoDeConocimie nto,acceso,sugerenciaEstiloAprendizaje+,mo dalidadConduccion+,autorRecurso,resumen)&gt; &lt;!ATTLIST recurso   titulo CDATA #REQUIRED   fechaCreacion CDATA #REQUIRED   fechaActualizacion CDATA #IMPLIED   formatoFuente CDATA #REQUIRED   keywords CDATA #REQUIRED   tipoRecurso (ejemplo practica ejercicio lectura libro video t utorial articulo otro) "otro"   duracion CDATA #IMPLIED &gt; &lt;!ELEMENT datosGeneralesRecurso EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST datosGeneralesRecurso   licencia CDATA #REQUIRED   nivel CDATA #REQUIRED   idiomaOriginal CDATA #REQUIRED   idiomaVersion CDATA #IMPLIED   duracion CDATA #IMPLIED&gt; &lt;!ELEMENT campoDeConocimiento (subCampoDeConocimiento*)&gt; &lt;!ATTLIST campoDeConocimiento   nombreCampoDeConocimiento CDATA #REQUIRED&gt; </pre>	<pre> &lt;!ELEMENT subCampoDeConocimiento EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST subCampoDeConocimiento   nombreSubCampoDeConocimiento CDATA #REQUIRED&gt; &lt;!ELEMENT acceso EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST acceso   url CDATA #REQUIRED   estatus (vigente noVigente) "vigente"&gt; &lt;!ELEMENT sugerenciaEstiloAprendizaje EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST sugerenciaEstiloAprendizaje   estilo (activo reflexivo teorico pragmatico) "activo"   porcentaje CDATA #REQUIRED &gt; &lt;!ELEMENT modalidadConduccion (estrategiaDocenteAsociada+)&gt; &lt;!ATTLIST modalidadConduccion tipoModalidad CDATA #REQUIRED&gt; &lt;!ELEMENT estrategiaDocenteAsociada EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST estrategiaDocenteAsociada   tipoEstrategia (AprendizajeBasadoEnProblemas AprendizajeOrientadoaPro yectos Debate Demostraciones Discusión Experimentos Expo sición LecturaDirigida TrabajoColaborativo ReportesEscritos) "Exposición"&gt; &lt;!ELEMENT autorRecurso EMPTY&gt; &lt;!ATTLIST autorRecurso   nombre CDATA #REQUIRED   apellido CDATA #REQUIRED   institucion CDATA #IMPLIED   email CDATA #IMPLIED &gt; &lt;!ELEMENT resumen (#PCDATA)&gt; </pre>
---	---

Tabla 4 Caracterización de un Recursos Educativo (recursos.xml).

<pre> &lt;?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?&gt; &lt;!DOCTYPE recursos SYSTEM "recursos.xsd"&gt; &lt;recursos&gt;   &lt;recurso titulo="Validacion con DTD" fechaCreacion="Jul-30-2015"     fechaActualizacion="Jun-30-2016" formatoFuente="pdf"     keywords="xml, dtd" tipoRecurso="practica" duracion="60"&gt;     &lt;datosGeneralesRecurso licencia="CC" nivel="intermedio" idiomaOriginal="ES" /&gt;     &lt;campoDeConocimiento nombreCampoDeConocimiento="Programacion web"&gt;     &lt;/campoDeConocimiento&gt;     &lt;acceso estatus="vigente" url="http://virtuami.izt.uam.mx" /&gt;     &lt;sugerenciaEstiloAprendizaje estilo="teorico" porcentaje="30" /&gt;     &lt;sugerenciaEstiloAprendizaje estilo="pragmatico" porcentaje="70" /&gt;     &lt;modalidadConduccion tipoModalidad="Laboratorio"&gt;     &lt;estrategiaDocenteAsociada tipoEstrategia="Aprendizaje basado en problemas"/&gt;     &lt;estrategiaDocenteAsociada tipoEstrategia="Trabajo colaborativo" /&gt;     &lt;estrategiaDocenteAsociada tipoEstrategia="Reportes escritos" /&gt;     &lt;/modalidadConduccion&gt;     &lt;autorRecurso apellido="Lopez" nombre="Aurelio" email="A.lopez@gmail.com" institucion="UAM" /&gt;     &lt;resumen&gt;&lt;/resumen&gt;   &lt;/recurso&gt; &lt;/recursos&gt; </pre>
--

Las planeaciones son creadas con ayuda del lenguaje PHP a través de un formulario y siguiendo la especificación del esquema planeación.xsd del mismo modo para validarlo. Se cuenta con un documento XML maestro (plantilla) que con ayuda de PHP se carga y completa con la información de una planeación institucional que se tiene almacenada en local. Con esto se facilita la asignación de modalidad de conducción, estrategias docentes y recurso educativos asociados a los subtemas de la planeación guía. En el caso de contar con una planeación (operacional) de trimestres anteriores, ésta se muestra para realizar cambios. Cabe mencionar que al haber cambios en los planes de estudio las planeaciones institucionales con las que cuenta Plan-EA deberán actualizarse. Las figuras 3 y 4 muestran un ejemplo de una planeación. En el caso de los recursos educativos, éstos se crean como un nuevo nodo llamado recurso el cual contiene la información que se necesita para caracterizar a un recurso educativo, la instancia mínima que se genera en esta acción se muestra en la figura 5. Se dispone de un archivo XML para almacenar las descripciones de cada recurso educativo que se agrega al sistema. Como puede observarse un recurso educativo puede utilizarse para diferentes estrategias docentes, diferentes planeaciones y ser recomendado para uno o varios estilos de aprendizaje indicándose el porcentaje de los mismos. Por ejemplo, una práctica de laboratorio puede ser utilizada para la modalidad de conducción Laboratorio y las estrategias docentes: aprendizaje basado en problemas, trabajo colaborativo y reportes escritos. Dicha práctica se recomienda para un estilo de aprendizaje pragmático (70%) y teórico (30%). A través de la interfaz de Plan-EA en la opción “recursos educativos” podemos buscar recursos por criterios como: estilos de aprendizaje indicando sus porcentajes, estrategia docente, campos de conocimiento, por mencionar algunos. En la opción “Planeación” se puede crear o modificar una planeación, en donde para cada subtema el docente puede especificar la modalidad de conducción, las estrategias docentes y buscar recursos educativos con criterios específicos e incorporarlos (a manera de vínculos) en la planeación en curso. La opción “Consultar planeaciones” permite hacerlo por tres diferentes filtro: clave de la UEA, por trimestre y por profesor, figuras 2 y 6.



Figura 3 Página de inicio del sistema, opciones disponibles para el módulo planeación.



Figura 4 Creación de una planeación académica detallada con recursos educativos.



Figura 5 Página para hacer consultas de recursos educativos.



Figura 6 Impresión de planeación (PDF) con vínculos a recurso educativos.

## Evaluación y resultados preliminares

La herramienta desarrollada se encuentra en valoración por profesores del área de Redes y Telecomunicaciones en la UAM Iztapalapa. Se han aplicado cuestionarios a profesores (experimentados y novatos) que imparten el curso de Temas Selectos de Bases de Datos para detectar las mejoras a realizarse en la aplicación a nivel de: usabilidad, reutilización de recursos educativos y planeaciones existentes. Por otro lado, el cuestionario también permite determinar si Plan-EA ha sido de ayuda para los profesores novatos (primera vez que imparten el curso) en la planeación del curso. Por los resultados preliminares podemos sugerir que la aplicación puede facilitar la reutilización efectiva de recursos educativos en la planeación de una Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA) y motivar el trabajo colegiado. Sin embargo, se considera aumentar el número de profesores encuestados, así como mejorar la encuesta para ser aplicada no solo al inicio sino también al final del curso. Dentro de las mejoras a realizarse se consideran incluir mecanismos de seguimiento. Lo cual, al final del curso permitiría hacer un balance entre lo realizado y lo faltante, facilitando la retroalimentación de la planeación inicial. Por otro lado, proponer una encuesta de satisfacción que muestre que los usuarios apoyan este tipo de aplicaciones, así como las sugerencias para mejorarla.



## **4. Conclusiones**

En este trabajo, hemos descrito una aplicación web llamada Plan-EA la cual permite crear o modificar planeaciones académicas considerando para cada subtema la modalidad de conducción, las estrategias didácticas asociadas y recursos educativos digitales tomando en cuenta los estilos de aprendizaje: activo, reflexivo, teórico y pragmático. Presenta una interfaz amigable para caracterizar una planeación académica facilitando la incorporación de los recursos educativos (RE) necesarios a partir de un repositorio de RE. Plan-EA cuenta con una base de datos con enfoque XML para la gestión de las planeaciones académicas detalladas y RE, esto sirve como guía para los profesores al momento de impartir nuevos cursos. Cabe mencionar que si bien la parte tecnológica es un facilitador para la creación, utilización y difusión de material educativo, es necesario que la institución educativa a través de sus directivos establezcan lineamientos para incentivar y reconocer al personal docente, en su labor de crear material educativo ad hoc a las necesidades de los discentes, así como compartir experiencias en el uso dichos recursos educativos para facilitar a nuevos profesores su incorporación a la institución y en beneficio de los estudiantes. Diversas vistas de los datos capturados en la aplicación pueden ser generadas, en este artículo se mostró la vista planeación detallada del curso Temas Selectos de Bases de Datos (TSBD). La cual incluye la modalidad de conducción, estrategias didácticas y recursos educativos recomendados para cada subtema, considerando el estilo de aprendizaje sugerido en el RE. La aplicación puede facilitar la reutilización efectiva de recursos educativos en la planeación de una UEA y motivar el trabajo colegiado. Finalmente, esta aplicación se encuentra en valoración por los profesores que imparten la UEA de TSBD. Al finalizar, se espera obtener una guía de estrategias didácticas y RE asociados que refuercen los estilos de aprendizaje débiles que dispone un estudiante y mantengan aquellos que son fuertes.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] E. Aguilera-Pupo, “La percepción de la comunicación en el estudio de los Estilos de Enseñanza Universitarios”. *Journal of learning Styles*. Vol 7. No. 14. 2014. Pp 2-19.
- [2] M. Aragón García, “Diagnóstico de los estilos de aprendizaje en los estudiantes: Estrategia docente para elevar la calidad educativa”. *CPU-e, Revista de Investigación Educativa*. Vol. 9. 2009.
- [3] C. Alonso, D. Gallego, P. Honey, *Los Estilos de Aprendizaje: Procedimientos de diagnóstico y mejora*. 7ª edición. 1994. Mensajero. Bilbao, España.
- [4] J. L. Garcia Cué, C. Sánchez Quitarar, M. Jiménez, M. Gutiérrez Tapias, “Estilos de Aprendizaje y Estrategias de Aprendizaje: un estudio en discentes de postgrado”. *Revista learning Styles Review*. Vol 1. No. 10. 2012. Pp.65-78.
- [5] D. Sampson, C. Karagiannidis, F. Cardinali, “An Architecture for Web-based e-learning Promoting Re-usable Adaptive Educational e-Content, *Educational Technology & Society Journal*” IEEE Learning Technology Task Force. Special Issue on Innovations in Learning Technology. Vol. 5. Issue 4. 2002.
- [6] J. Clares, A. A. Fernández, “Evaluación de un curso b-learning de formación continua en comunicación y relación comercial, con apoyo de métodos activos presenciales, y conocimientos en Estilos de Aprendizaje, Inteligencia Emocional”. *Journal of Learning Styles*. Vol 5. No. 10. 2012.
- [7] I. R. Montes, J.L. García Cué, D. Del Valle, C. Medina-Ramírez, “Sistema Gestor de objetos de aprendizaje para ciencias agrícolas (SIGEOAA)”. *Revista RMDI Materia Didáctico Innovador, Nuevas Tecnologías Educativas*. ISSN: 1870-2066 Vol. 11. 2015. Pp. 152-160.
- [8] R. C. Medina-Ramírez, C. A. López Pérez, F. Casco Sánchez, “Aplicación web para la generación de material didáctico incorporando recursos educativos”. *Pistas Educativas Número 112*. 2015. Páginas: 1721-1739.

- [9] Diagnóstico de la situación de los repositorios institucionales en las IES mexicanas. [http://www.remeri.org.mx/remeri/REMERI\\_DIAGNOSTICO\\_2013\\_01.pdf](http://www.remeri.org.mx/remeri/REMERI_DIAGNOSTICO_2013_01.pdf). Mayo 2016.
- [10] Guía para la definición de modalidades de conducción para las unidades enseñanza-aprendizaje. [http://cbi.izt.uam.mx/consejo-divisional/Documentos\\_Basicos\\_Diseño\\_Curricular/docs\\_basic\\_uami\\_02.pdf](http://cbi.izt.uam.mx/consejo-divisional/Documentos_Basicos_Diseño_Curricular/docs_basic_uami_02.pdf). Junio de 2016.
- [11] J.V Burgos Aguilar. Recursos Educativos Abiertos en Ambientes Enriquecidos con Tecnologías. Editores María Soledad Ramírez Montoya, José Vladimir Burgos Aguilar. 2012. ITESM ebook.
- [12] Learning Style changes over time. It is not static. It changes. The Dunn & Dunn Learning Style Model. <http://www.learningstyles.net>. Junio de 2016.
- [13] D. McCreary, A. Kelly. Making sense of NoSQL. Shelter Island: Manning, 19-20. 2014. [http://macc.foxia.com/files/macc/files/macc\\_mccreary.pdf](http://macc.foxia.com/files/macc/files/macc_mccreary.pdf). [Último acceso: 14 de junio de 2016].
- [14] Alternatives to relational database: Comparison of NoSQL and XML approaches for clinical data storage. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.10.018>.
- [15] Nicolás Mata A. Reporte de Servicio Social.
- [16] Manual de estilos de aprendizaje. SEP-DGB. México. 2004.

## 6. Autores

Lic. Aurelio Nicolás Mata es Licenciado en Computación por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (2016). Sus intereses incluyen sistemas de información y tecnologías emergentes.

Dra. Reyna Carolina Medina Ramírez obtuvo su grado de Doctor en Ciencias (especialidad Computación) de la Universidad de Nice-Sophia Antipolis, Francia en 2003. Desde septiembre de 2005 es profesora adscrita al Departamento de Ingeniería Eléctrica en la UAM unidad Iztapalapa. Actualmente es jefa del Área de investigación de Redes y Telecomunicaciones. Sus intereses de investigación incluyen web semántica y datos abiertos enlazados aplicados a la educación.

Dr. Fausto Casco Sánchez obtuvo su grado de Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma Metropolitana en 1997. Desde abril 1977 es profesor adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa, Sus intereses de investigación incluyen diseño de filtros digitales y algoritmos para filtrado adaptable con aplicación a las comunicaciones, así como desarrollo de material didáctico.

# **PROPUESTA DE PROGRAMA EDUCATIVO EN LÍNEA: UNA EXPERIENCIA ACADÉMICA DE LA LICENCIATURA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

***Javier Aguilar Parra***

Universidad Autónoma de Baja California Sur  
*jaguilar@uabcs.mx*

***Jaime Suárez Villavicencio***

Universidad Autónoma de Baja California Sur  
*jsuarez@uabcs.mx*

***Elvia Esthela Aispuro Félix***

Universidad Autónoma de Baja California Sur  
*aispuro@uabcs.mx*

## **Resumen**

La Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), y el Departamento Académico de Sistemas Computacionales (DASC), conscientes de que existe la necesidad de atender a un segmento de la población, que por razones diversas no pueden permanecer en los programas presenciales que son ofertados en la institución, a incluido en su plan de trabajo 2015-2019 "Generar las condiciones para ofrecer al menos un programa de licenciatura, por área de conocimiento, en la modalidad de educación a distancia" [1]. Por lo que se da inicio con los estudios de factibilidad del programa educativo a distancia Licenciatura en Tecnologías de la Información (LTI).

Es importante destacar que es el primer programa educativo a distancia que se oferta en cualquier institución de nivel superior pública o privada en el Estado de Baja California Sur (BCS), con lo cual se pretende dar cobertura a todas las localidades urbanas y rurales de los cinco municipios del estado, y por supuesto al

resto de la republica mexicana y el extranjero. En base a lo expuesto, este articulo presenta los resultados del estudio de factibilidad del programa educativo LTI.

**Palabra(s) Clave(s):** Administración de tecnologías de la información, educación a distancia, educación en línea, tecnologías de información, comunicación TIC.

## **1. Introducción**

La globalización y sustentabilidad lleva a imponernos nuevos retos y desafíos educativos, tratando de encontrar nuevas ofertas formativas se acude al desarrollo de propuestas donde estén incluidas las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), es por esto que el DASC de la UABCS entiende este nuevo panorama y hace la propuesta de desarrollar una nueva licenciatura en la modalidad de educación a distancia. La propuesta está fundamentada en un programa educativo de Licenciatura en Tecnologías de la Información (LTI), y para la ello se toman como base los lineamientos de la Asociación Nacional de Instituciones de Educación en Tecnologías de la Información A.C. (ANIEI), el Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación (CONAIC) instituciones que certifican las carreras en informática, computación y tecnologías de la información a nivel nacional.

Para formalizar los estudios de factibilidad del programa educativo LTI se identificaron necesidades sociales, sobre todo de aquellas localidades donde no hay acceso a la educación superior, la necesidad de jóvenes trabajadores que son pilar fundamental del sostén de su familia y tiene la imperante necesidad del desarrollo académico y por ende su mejora laboral para satisfacer las necesidades económicas de sus hogares, y al mismo tiempo tenga una influencia en el desarrollo de los municipios del estado de BCS, pero sin dejar de lado las necesidades y problemáticas de la región y del país.

Para la realización del estudio de factibilidad se realizó una investigación documental que consistió en la revisión de material bibliográfico, estadístico y de información relacionada con las TIC, se realizó una investigación de campo donde el principal instrumento de recolección de datos es la encuesta en dependencias de gobierno e instituciones privadas, entre las que destacan Secretaría de

Educación Pública, Ayuntamiento de la ciudad de La Paz, instituciones financieras, Colegio de Bachilleres, Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos entre otras dependencias del gobierno estatal.

## **2. Desarrollo**

Es pertinente definir que es educación a distancia, la cual es una modalidad de enseñanza abierta, para A. W. Bates. "la enseñanza abierta puede incluir a la educación a distancia, o depender de otras formas más flexibles de enseñanza, incluso una combinación de estudio independiente y enseñanza en vivo" [2]. La propuesta de educación a distancia que se hace, se encuentra situada en la combinación de estudio independiente y enseñanza que plantea A. W. Bates ya que los estudiantes en la dimensión de enseñanza aprendizaje tendrán que realizar actividades síncronas y asíncronas de manera remota.

Para ver la factibilidad del programa educativo en modalidad a distancia se realiza un análisis desde diferentes dimensiones, como lo sugiere A. W. Bates quien propone los siguientes criterios:

- Acceso, ¿Qué tan accesible es la tecnología para los estudiantes?
- Costos, ¿Cuál es la estructura de costos de cada tecnología?
- Enseñanza aprendizaje, ¿Qué tipo de aprendizaje se necesita?, ¿Qué planteamientos de instrucción satisfarán mejor estas necesidades?
- Novedad, ¿Qué tan nueva es esta propuesta?
- Rapidez, ¿Qué tan rápido pueden montarse los cursos en esta tecnología?

[2].

## **3. Metodología**

El estudio se desarrolló bajo dos enfoques: investigación documental y de campo, donde se analizaron las dimensiones educativa y social, en la investigación documental se revisaron los principales indicadores que permiten dar cuenta de la factibilidad de ofertar un programa educativo a distancia, desde las diferentes dimensiones que sugiere A. W. Bates.

En la investigación de campo se realizó un estudio de factibilidad sustentado en el método cuantitativo de tipo descriptivo, acudiendo como principal instrumento de recolección de datos a la encuesta.

## 4. Estudio documental

### Acceso

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en México los hogares con acceso a internet en el 2011 se encuentran por encima de países como China e India [3], como se puede observar en figura 1.

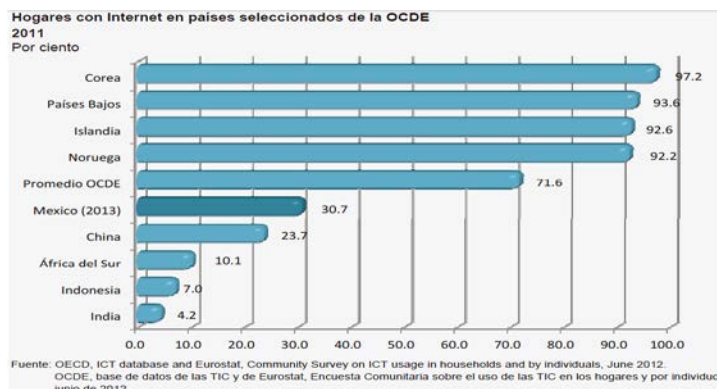


Figura 1 Porcentaje de hogares con internet en algunos países de la OCDE.

Según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2013, el 30.7% de los hogares en México tiene acceso a internet [3], como se puede observar en la figura 2. Éste estadístico nos lleva a pensar que el acceso a internet debe de ser mayor para el 2016 en los hogares mexicanos.



Figura 2 Porcentaje de penetración de las TIC en los hogares mexicanos.



El INEGI, destaca que los indicadores de disponibilidad por entidad federativa de los hogares con Internet, si bien el promedio nacional es comparable con el de otros países como se aprecia en la figura 3, las proporciones regionales muestran diferencias importantes. Y respecto de los resultados estatales del módulo 2011 los resultados muestran avances diferenciados.

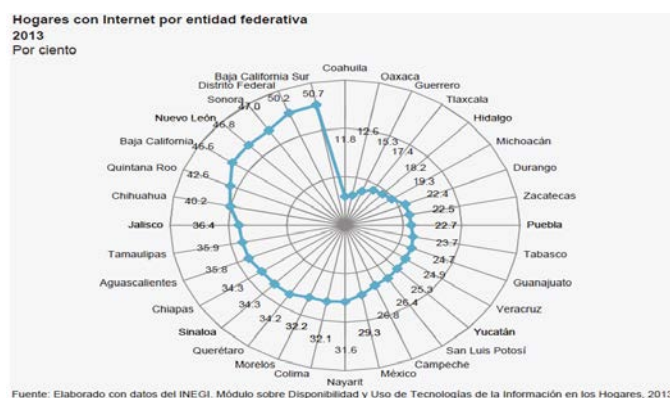


Figura 3 Porcentaje de hogares con internet en México.

Para el 2011 “Solamente en seis entidades, Baja California Sur, Distrito Federal, Baja California, Quintana Roo, Nuevo León y Sonora, al menos un tercio de los hogares cuenta con conexión a la red mundial de información” [3]. Para el 2013, ya son trece entidades en dónde al menos un tercio de los hogares cuentan con Internet. De hecho, en Baja California Sur y el Distrito Federal la proporción es de poco más del 50 por ciento como se muestra en la figura 3. Esta situación favorece enormemente para la implementación de un programa educativo a distancia en la UABCS.

Es importante señalar que el acceso a internet en las instalaciones de la UABCS para los alumnos y profesores es gratuito. El servicio se otorga en modalidad alámbrica e inalámbrica. El acceso alámbrico se brinda dentro del macrocentro de la institución y en los laboratorios de cómputo del DASC. El acceso inalámbrico tiene una cobertura a nivel campus, permitiendo que los alumnos y docentes puedan tener servicio de Internet en cualquier ubicación y hora.

La red inalámbrica universitaria consiste de 25 puntos de acceso ubicados estratégicamente al exterior e interior de los edificios. Adicionalmente se cuenta

con un convenio de colaboración con Telmex para la instalación de puntos de acceso al servicio de INFINITUM MÓVIL.

En el contexto local específicamente en localidades rurales de los cinco municipios que conforman la entidad de BCS, para saber el tipo de acceso que existe en estas comunidades, se solicitó información a la Centro de Comunicación Tecnológica Educativa (CEOTED) encargado de coordinar cursos a distancia de la Secretaría de Educación Pública (SEP) del Estado de BCS, se informa por parte de este centro que existen 78 localidades rurales con conexión satelital [4], distribuidos como se muestra en la tabla 1. Cabe mencionar que estas localidades tienen instalaciones educativas de telesecundarias y/o telebachillerato, por lo que en estas comunidades rurales existe en sus estudiantes la experiencia educativa en su modalidad a distancia, esta condición los hace candidatos potenciales para cursar la LTI.

Tabla 1 Número de localidades rurales por municipio con acceso a internet.

<b>Municipio</b>	<b>Localidades</b>
Los Cabos	13
La Paz	25
Comondú	6
Loreto	4
Mulegé	30

## **Costos**

En lo que atañe a la dimensión a distancia se implementará la plataforma educativa Moodle, al ser software libre no tiene costo económico, solo hay que descargarlo, instalarlo y configurarlo en un servidor, al respecto la UABCS ya cuenta con este servicio.

Se considera que es necesario un aula de medios virtuales, la cual se utilizará para impartir clases, asesorías o tutorías debidamente programadas a uno a varios estudiantes, ya que la educación a distancia no excluye o reemplaza al profesor ni al aula tradicional, ya que las grandes distancias físicas han dejado de ser un obstáculo para conocer e intercambiar conocimientos con personas en

otras latitudes, al respecto el DASC cuenta con el espacio físico, solo hay que dotarlo del mobiliario y equipo de cómputo, por lo que la inversión en este rubro es mínimo.

La aplicación que se recomienda implementar para las clases, asesorías o tutorías en el aula de medios virtual es Google Hangouts, esta herramienta forma parte de los servicios que se brindan con una cuenta de correo electrónico de Gmail, al respecto la UABCS gestiona las cuentas de correo electrónico con Gmail, por lo que todo el personal docente y estudiantes tiene acceso a Google Hangouts.

Respecto a la planta docente el DASC, cuenta con el personal académico con el perfil deseado para este proyecto educativo, ya que actualmente los docentes adscritos al departamento académico en mención, utilizan Moodle para actividades de apoyo en su práctica docente, por lo que se tiene experiencia en el uso y manejo de plataforma educativa Moodle, por tanto no es necesario invertir en gastos de capacitación del personal docente.

### **Enseñanza aprendizaje**

El paradigma educativo institucional está basado en competencias, bajo este esquema una competencia que se promueve es el uso de las TIC en los procesos de enseñanza-aprendizaje, entonces es aquí donde encontramos un nicho de oportunidad, ya que los sistemas de educación a distancia, al haber adoptado enfoques tecnológicos de enseñanza y un paradigma socioeducativo básicamente conductista, sentaron las bases de lo que habría de ser el sistema de enseñanza incluyente ya que no importa la barrera de la distancia.

El uso de medios electrónicos como la radio, la televisión, el teléfono y la computadora se convertirán según el enfoque tecnológico adoptado en recursos de apoyo indispensables en un sistema que organiza su instrucción alrededor de un texto impreso que adquiere las características de un medio maestro por su condición de autosuficiencia.

La enseñanza dirigida con objetivos de aprendizaje, calendarios y guías de estudio, ejercicios de autoevaluación para asegurar el avance de los estudiantes hacia el logro de objetivos son las características de los sistemas de educación a

distancia que cada vez se manifiestan ante la posibilidad de una educación abierta que ofrece mayores libertades al alumno, todas estas posibilidades las ofrece Moodle.

### **Plataforma educativa Moodle**

La plataforma educativa que se utilizará es Moodle, definido por A. Fernández, M. Goicoechea, L. Hernández y D. López "como un sistema de gestión de cursos (Learning Management System, LMS) que ayuda a los educadores a crear comunidades de aprendizaje en línea" [5]. Esta plataforma educativa es de fácil acceso ya que garantiza interactividad, flexibilidad, escalabilidad, usabilidad, ubicuidad, funcionalidad, estandarización y soporte; además de ser software libre, es decir no tiene costo económico y las actualizaciones siempre se encuentran disponibles, al respecto la UABCS ya cuenta con esta plataforma educativa, si bien en la institución no se tienen ofertas educativas a distancia, Moodle se utiliza como apoyo a la modalidad presencial.

Se está consciente que existen otras plataformas educativas pero en la UABCS existe el dominio de la plataforma Moodle, ya que por casi una década ayuda a los docentes a las actividades propias de la enseñanza y a los estudiantes a construir sus conocimientos, ya que las herramientas con las que cuenta esta plataforma educativa son: tareas, foros, gestión de contenido (recursos), cuestionarios con distintos tipos de preguntas, blogs, wikis, encuestas, chat, glosarios y evaluación entre pares [6].

Las herramientas de comunicación con las que cuenta Moodle son el Chat y el Foro; El chat, permite a los participantes tener una discusión sincrónica en tiempo real dentro de un curso Moodle; y foro les permite a los estudiantes y profesores intercambiar ideas al publicar comentarios como parte de un 'hilo' de una discusión. Se pueden incluir archivos tales como imágenes y multimedios dentro de las publicaciones en foro. El profesor puede elegir valorar publicaciones en foros y también es posible darles permiso a los estudiantes para que valoren las publicaciones de unos a otros [6].

Las herramientas de enseñanza-aprendizaje con las que cuenta Moodle son glosario, Learning Environment Survey y Attitudes to Thinking and Learning Survey; el glosario les permite a los participantes crear y mantener una lista de definiciones, similar a un diccionario; Learning Environment Survey y Attitudes to Thinking and Learning Survey, propicia la estimulación del aprendizaje en ambientes en línea. Los maestros pueden usar estas actividades para recolectar datos de sus alumnos, que les ayudarán a conocerlos y reflexionar sobre su propia enseñanza [6].

Las herramientas de evaluación con las que cuenta Moodle son tarea, examen, wiki, encuesta; la tarea de Moodle proporciona un espacio en el que los estudiantes pueden enviar sus trabajos para que los profesores los califiquen y proporcionen retroalimentación; el examen, le permite al maestro diseñar y construir exámenes que consisten de una gran variedad de tipos de preguntas, incluyendo preguntas de opción múltiple, falso-verdadero y respuesta corta. Estas preguntas se mantienen en el Banco de preguntas y pueden ser re-utilizadas en diferentes exámenes; la wiki es una colección de documentos web escritos en forma colaborativa. Básicamente, una página de wiki es una página web que todos en su clase pueden crear juntos encuesta predefinida, (survey) es una actividad de curso que proporciona varios instrumentos de encuestación verificada, [6].

Lo más novedoso es el acceso móvil está activado por defecto en las nuevas instalaciones de Moodle.

### **Novedad**

Esta propuesta educativa a distancia es la primera que se plantea en cualquier institución educativa de nivel superior ya sea pública o privada en el estado de BCS, más que novedosa es un proyecto viable, moderno y actual, además como valor agregado brinda una oportunidad única de estudio a los habitantes del estado de BCS y de la región, particularmente a los ciudadanos que tienen la ambición de desarrollarse en el área de las Tecnologías de Información y que por diversos motivos no pueden cursar una carrera en la modalidad presencial.

## **Rapidez**

Se tiene todas las condiciones tecnológicas y educativas favorables, ya se cuenta con la plataforma educativa Moodle donde se configurara las materias conforme avances los semestres.

Respecto al perfil y la experiencia del personal docente del DASC cuenta con el perfil deseado para esta empresa, ya que los profesores que tiene más de un semestre impartiendo cátedra en el DASC utilizan la plataforma educativa Moodle como herramienta de apoyo para sus estrategias de enseñanza y aprendizaje. Estos representan de 95% de los profesores

De la planta docente del DASC, que son 37 profesores, 12 de ellos cuentan con algún estudio de posgrado en la modalidad a distancia, lo que representa el 32% del personal académico. Esta experiencia formativa es muy valiosa e importante para la implementación del programa educativo a distancia.

## **5. Investigación de campo**

Se analizó la oferta educativa realizando un estudio de factibilidad, sustentado en el método cuantitativo de tipo descriptivo, acudiente como instrumento de datos a la encuesta.

El cuestionario se diseñó como lo plantean G. Rodríguez, J. Gil y J. García "se realiza sobre la base de un formulario previamente preparado y estrictamente normalizado. Allí se anotan las respuestas, en unos casos de manera textual y en otros de forma codificada. Suelen contener entre cinco y veinticinco preguntas abiertas-cerradas" [7]. El cuestionario que se diseñó fueron 15 preguntas, todas ellas relacionadas con el uso de las TIC en su vida en el hogar y en el trabajo; también se incluyeron preguntas sobre en el interés de realizar estudios en su modalidad a distancia.

## **Descripción de la muestra**

La muestra es de 168 personas y se realizaron en diferentes entidades laborales destacado la Secretaría de Educación Pública, Ayuntamiento de la

ciudad de La Paz, instituciones financieras, Colegio de Bachilleres, Colegio de Estudios Científicos y Tecnológicos entre otras dependencias del gobierno estatal. La información recolectada en la encuesta nos muestra en la figura 4, que los encuestados fueron exactamente el 50% de hombre y 50% de mujeres.

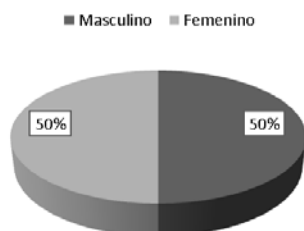


Figura 4 Género de las personas encuestadas.

Las edades de los encuestados fueron mayores de 20 años de edad como se observa en la figura 5. Destacando que los que fluctúan entre 31-40 años que representan el 48% de los encuestados.

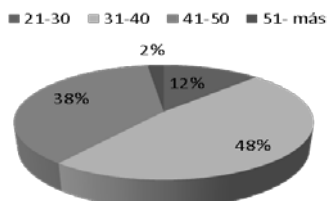


Figura 5 Edades de las personas encuestadas.

Una de las preguntas que se hizo fue sobre el uso de las TIC en su vida cotidiana, es decir para actividades en el hogar, en el trabajo o de esparcimiento, los resultados se muestran en la figura 6. El dato que destaca es que el 83% de los encuestados habitualmente utiliza las TIC en las actividades de su vida cotidiana.



Figura 6 Uso de las TIC en actividades de su vida cotidiana.

A la pregunta si ofrecieran una carrera en línea en la área de tecnologías de la información ¿te gustaría estudiarla? El 79% de los encuestados respondió que si, como se observa en la figura 7. Con esta información recolectada podemos concluir que si existe un interés real por personas laboralmente activas, por estudiar una carrera en la disciplina de tecnologías de la información, y que además no le son ajenos el uso de la las TIC en su vida cotidiano, incluyendo por supuesto la laboral.

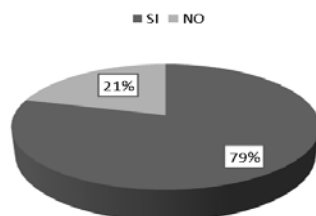


Figura 7 Interés de estudiar una carrera en el área de tecnologías de la información.

## 6. Fundamento pedagógico

La estructura curricular de la carrera Licenciatura en Administración de Tecnologías de Información, considera en el ámbito psicopedagógico, el modelo educativo y los lineamientos para el diseño y actualización de planes de estudios de la UABCS, y en el ámbito disciplinar, los criterios establecidos por organismos especializados en el área a nivel nacional.

A nivel nacional, se toman como base los lineamientos de la Asociación Nacional de Instituciones de Educación en Tecnologías de la Información A.C. (ANIEI), el Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación (CONAIC) y los Comités Interinstitucionales para la Evaluación de la Educación Superior (CIEES). ANIEI, establece el perfil de la Licenciatura en Tecnologías de la Información (LTI) como el Profesional con conocimientos sólidos de las tecnologías de información aplicadas al proceso administrativo de las organizaciones. Así como un estratega tecnológico que desarrolla e implanta soluciones informáticas para apoyar la competitividad de las empresas. Facilitador de la toma de decisiones y la reingeniería de procesos para administrar conocimiento y proveer agilidad a las organizaciones.



Las áreas del conocimiento y el porcentaje de créditos que se sugiere para este perfil se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Criterios establecidos por ANIEI para el perfil en Licenciatura en Informática [8].

Área de conocimiento Establecidas en ANIEI	Porcentaje establecido ANIEI
Entorno social	30
Matemáticas	10
Arquitectura de computadoras	5
Redes	7.5
Software de base	7.5
Programación e ingeniería de software	17.5
Tratamiento de información	17.5
Interacción hombre-máquina	5

Por otro lado, el CONAIC propone que los programas del área de informática y computación deben contar con las siguientes unidades mínimas de cada área del conocimiento [8], como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Criterios establecidos por CONAIC para programas de computación.

Área	Unidades mínimas	%
Ciencias Sociales, humanidades y otras	300	17.4
Matemáticas y ciencias básicas	420	24.4
Informática y Computación	1000	58.2
TOTAL DE UNIDADES MÍNIMAS DE PROGRAMA	1720	100

Dentro del área de conocimiento Informática y Computación, se deben de cubrir las siguientes unidades mínimas, como se muestra en la tabla 4 [8].

## 7. Resultados y conclusiones

De los primeros resultados podemos concluir que en el rubro de la dimensión de acceso, no existen inconvenientes, ya que en BCS el 50% de los hogares tiene acceso a internet, y además es el primer lugar nacional en este rubro, lo que se considera un punto favorable para emprender el proyecto educativo a distancia.

Tabla 4 Criterios establecidos por CONAIC programa de Licenciatura en Informática.

Área	Unidades mínimas	% del total del programa
Entorno social	300	12.6
Matemáticas	100	4.2
Arquitectura de computadoras	50	2.1
Redes	75	3.15
Software de base	75	3.15
Programación e ingeniería de software	175	7.35
Tratamiento de información	175	7.35
Interacción hombre - máquina	50	2.1

Respecto a la dimensión de enseñanza y aprendizaje se tiene a favor que se cuenta con la infraestructura y el personal docente necesario para emprender un proyecto educativo a distancia de esta magnitud, ya que actualmente ninguna institución de nivel superior pública o privada en el estado de BCS tiene en sus ofertas educativas programas a distancia, resaltando que esta modalidad educativa permite a jóvenes que no tienen la posibilidad de estudiar en la modalidad presencial, una alternativa seria que les permita cursar una licenciatura que contribuirá a su desarrollo personal, profesional y laboral, esta consideración emana de las encuestas hechas a 168 trabajadores encuestados, el 79% de estos, lo ven como una opción para prepararse profesionalmente.

Cabe mencionar que la novedad del programa educativo a distancia LTI es una aérea de oportunidad que permitirá a la UABCS tener presencia en todo el territorio nacional y más allá de sus fronteras, y el DASC tiene todos los elementos tecnológicos y pedagógicos para hacerlo, respecto a la infraestructura en la UABCS desde hace una década cuenta con los servicios de Moodle plataforma educativa que permite el proceso enseñanza a distancia, resaltando que los docentes del DASC tienen la experiencia y competencias que se necesitan para el manejo de la plataforma educativa en cuestión.

La rapidez para montar la plataforma educativa no es problema ya que como se mencionó la UABCS desde hace una década cuenta con un servidor de Moodle.

En lo que respecta al análisis hecho de los lineamientos de la Asociación Nacional de Instituciones de Educación en Tecnologías de la Información A.C. (ANIEI), y el Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación (CONAIC), se concluye que la fundamentación del plan de estudio de la LTI es del Perfil "A" Informática.

Por lo tanto se obtiene como resultado la retícula de la Licenciatura en Tecnologías de Información (LTI) que a continuación se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Retícula de la Licenciatura en Tecnologías de Información (LTI).

1	2	3	4	5	6	7	
Metodología de la programación	Programación	Programación Web	Seguridad Informática	Programación Móvil	Diseño de interfaces	Desarrollo de emprendedores	
Introducción a las tecnologías de la información	Estructura de Datos	Interacción humano maquina	Administración de tecnologías de la Información	Optativa 1	Optativa 2	Evaluación de normas de seguridad físicas y lógicas.	
Estrategias de aprendizaje y habilidades digitales	Paradigmas Tecnológicos	Base de datos I	Base de datos II	Métodos numéricos	Optativa 3	Optativa 4	
Matemáticas	Algebra lineal	Investigación de operaciones	Virtualización	Estadística aplicada	Graficación y Multimedia	Optativa 5	
Ética profesional y derecho informático	Modelo Organizacional y SI	Modelos de Negocios	Modelos de Calidad	Ingeniería de software	Seminario de Proyectos de TI	Optativa 6	
Inglés I	Inglés II	Redes I	Redes II	Sistemas de Información Gerencial	Sistemas para la toma de decisiones	Desarrollo de un proyecto en tecnologías de la información	
Entorno social 30% = 10.8 Mat.	Matemáticas1 0% = 3.6 Mat.	Arquitectura de computadoras5 % = 1.8 Mat.	Redes7.5%= 2.17 Mat.	Software Base 7.5%=2.17 Mat	Programación e Ing-Software 17.5%=6.3 Mat.	Tratamiento de información 17.5% = 6.3 Mat	Interacción hombre-máquina 5% = 1.8 Mat.

## 8. Bibliografía y Referencias

- [1] Programa de Trabajo 2015-2019. Universidad Autónoma de Baja California Sur. México. 2015.
- [2] A. W. Bates. La tecnología en la enseñanza abierta y la educación a distancia. 1999. Editorial Trillas. México.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estadísticas sobre disponibilidad y uso de tecnología de información y comunicaciones en los hogares, 2013. INEGI. México. 2014.

- [4] Centro de Comunicación Tecnológica Educativa (CEOTED). Informe Ciclo Escolar 2014-2015. SEP-BCS. México. 2015.
- [5] A. Fernández, M. Goicoechea, L. Hernández y D. López. Filología y Tecnología: introducción a la escritura, la informática, la información. 2012. Editorial Complutense, S. A. Madrid.
- [6] Moodle. Características de Moodle. <https://docs.moodle.org>. Junio de 2016.
- [7] G. Rodríguez, J. Gil y J. García. Metodología de la investigación cualitativa. Ediciones Aljibe. España. 1996.
- [8] Consejo Nacional de Acreditación en Informática y Computación (CONAIC) y Asociación Nacional de Instituciones de Educación en Tecnologías de la Información (ANIEI). Modelos Curriculares del Nivel Superior de Informática y Computación. de <http://www.impulsati.org/ANIEI/modelos-curriculares-2/modelos-curriculares/>. Junio de 2016

## **10. Autores**

El MTE Javier Aguilar Parra es Profesor-Investigador de tiempo completo de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), adscrito al Departamento Académico de Sistemas Computacionales (DASC), Baja California Sur, México. El tiene Maestría en Tecnología Educativa (MTE) egresado de la Universidad Da Vinci, D.F., México., y Maestría en Sistemas Computacionales (MSC) egresado del Instituto Tecnológico de La Paz, Baja California Sur, México. Actualmente es Candidato a Doctor en Investigación Educativa por la Universidad Pedagógica del Estado de Sinaloa (UPES), Sinaloa. México.

Trabaja con las líneas de investigación en el desarrollo de software educativo y aplicaciones colaborativas. Es autor de diversos artículos y ponencias en congresos y simposios nacionales e internacionales.

El MSC Jaime Suárez Villavicencio egresado del Instituto Tecnológico de La Paz, Baja California Sur, México, de la Licenciatura Ingeniería en Sistemas Computacionales, en 1994. Realizó estudios de maestría, obteniendo el grado de Maestro en Sistemas Computacionales (MSC) en 2007 y actualmente labora como docente e investigador en la Universidad Autónoma de Baja California Sur

(UABCS). Trabaja con las líneas de investigación en el desarrollo de software educativo y aplicaciones colaborativas. A realizados diversas publicaciones en congresos y revistas arbitradas nacionales e internacionales, autor de un libro y presentación de ponencias en foros nacionales e internacionales.

La MSC Elvia Esthela Aispuro Félix es Profesor-investigador de tiempo completo de la Universidad de Baja California Sur (UABCS), titular de las asignaturas de programación en las carreras de Ingeniería en Desarrollo de Software e Ingeniería en Tecnología Computacional. Ha realizado su Maestría en Sistemas Computacionales (MSC) con Especialización en Ingeniería de Software, sus actividades de investigación principalmente promueven el desarrollo de herramientas de software que ayuden a mejorar la enseñanza de la ingeniería así como el desarrollo de tecnología adaptativa.

# IMPORTANCIA DEL CÁLCULO EN EL DESARROLLO ACADÉMICO DEL INGENIERO

***Elena Fabiola Ruiz Ledesma***

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo  
*efruiz@ipn.mx*

***Enrique Alfonso Carmona García***

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo  
*eacarmona860920@gmail.com*

***Ángel Salvador Montiel***

Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Cómputo

## **Resumen**

El estudio que se reporta en el presente documento se enfoca en el análisis de los conocimientos adquiridos en la disciplina de Cálculo por estudiantes que cursaban sus últimos semestres; para lo cual se tomó una muestra de 20 alumnos de la Ingeniería en Sistemas Computacionales de la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional. La metodología empleada en este estudio consistió en el diseño y aplicación de un cuestionario, el cual se dividió en dos partes: En la primera se hizo una revisión del estado académico en el que se encontraban y el nivel de conocimientos que creían tener en la disciplina de Cálculo. La segunda parte evaluó los conocimientos que realmente tienen en dicha disciplina, para lo cual se emplearon preguntas tanto conceptuales como algorítmicas y de aplicación. Para el tratamiento de la información obtenida del cuestionario, se empleó como herramienta la estadística inferencial.

Los resultados obtenidos permitieron desarrollar una propuesta para aminorar las deficiencias encontradas, la cual consistió en un sitio web, que contiene material de apoyo, como guías, apuntes, tutoriales, simulaciones de gráficas, para mejorar los conocimientos de los alumnos de niveles avanzados de la Escuela Superior de Cómputo.

**Palabra(s) Clave(s):** Análisis, aprendizaje, conocimientos de cálculo, ingeniería en sistemas computacionales.

## 1. Introducción

Los ingenieros han marcado los avances de la civilización a lo largo de toda la historia, y su presencia e influencia se ha acrecentado a partir de la Revolución Industrial. En las últimas décadas se han generado avances procedentes de la ingeniería que han mejorado cada aspecto de la vida humana. Por otro lado, todos estos avances han dado paso a una serie de desafíos sin precedentes, a medida que la población crece y necesita expandirse, el problema de la sostenibilidad sigue aumentando, al igual que la necesidad de mejorar la calidad de vida. Según los científicos de la NAE (National Academy of Engineering) [1]: “los desafíos para el ingeniero del siglo XXI, son los siguientes:

- Conseguir que la energía solar sea accesible
- Restaurar y mejorar las infraestructuras urbanas
- Avanzar en la informática para la sanidad
- Diseñar mejores medicamentos
- Proteger el ciberespacio
- Enriquecer la realidad virtual
- Avanzar en el aprendizaje personalizado
- Diseñar herramientas para el descubrimiento científico”.

Ello implica incrementar el conocimiento de los futuros ingenieros, para así poder mejorar las condiciones económicas de su país y de esta forma estar a la vanguardia en tecnología y desarrollo científico.

## 2. Desarrollo

Diversas investigaciones han analizado la eficacia de la enseñanza del Cálculo, por parte de los profesores, y del aprendizaje de la misma por parte de los alumnos, tanto en el nivel medio superior como en nivel superior.

Por ejemplo, Zúñiga [2] menciona que: *“el aprendizaje del Cálculo para Ingeniería debería abordarse partiendo de la imperativa necesidad del desarrollo de profesionales en un mundo, donde cada vez más escasean los recursos naturales, lo que demanda imaginación, creatividad y competencia para el mejor aprovechamiento de los que aún quedan, situación que, en gran medida, les corresponderá a los ingenieros resolver”*. Es decir la formación de ingenieros demanda un considerable aprendizaje de las matemáticas que contribuyan a resolver problemas de orden técnico y tecnológico, pero sobre todo práctico. Las matemáticas que requiere un ingeniero deben constituir recursos, herramientas e instrumentos capaces de lograr la optimización en el uso de los recursos que la humanidad posee y requiere para su desarrollo. Un problema importante presentado en este artículo es que el conocimiento generalmente se trata fuera de contextos apropiados. Así, cuando se pretende mostrar a los estudiantes la utilidad de los contenidos que se estudian, a lo más que se llega en un curso común de cálculo es a resolver los llamados problemas de aplicación que se proponen en los textos, que casi nunca corresponden a la realidad.

Por otra parte, Camarena [3] menciona que *“parte de la problemática en ingeniería es que la matemática se encuentra totalmente desvinculada de las asignaturas de la ingeniería, y la realidad del ingeniero reclama esta vinculación que en materia de educación está en tierra de nadie”*. Esto nos hace concluir que “saber matemáticas” solo significa, para la mayoría de los alumnos, tener alguna habilidad en la resolución de ecuaciones, desarrollar procedimientos, aplicar fórmulas y métodos. En vez de que el estudiante conciba a las matemáticas como algo que le pueda ser útil más allá de eso.

Por último, en [2] se menciona que durante la formación de los ingenieros se debe poner énfasis en desarrollar mentes maduras y educar ingenieros que puedan pensar. Identifica al uso de las técnicas matemáticas como: “un medio poderoso para lograr este objetivo sobre todo si son utilizadas para describir, modelar y resolver situaciones técnicas. La matemática es la herramienta más poderosa para el ingeniero y su dominio desde los principios de su carrera le permitirá un rápido progreso en temas específicos de su formación profesional”.



Las investigaciones citadas proponen argumentos teóricos, estudian el problema de las deficiencias en la formación científica-básica y hacen propuestas didácticas. En el presente artículo se presenta un estudio específico de los alumnos de la Escuela Superior de Cómputo del IPN de cuarto nivel -los cuales están próximos a egresar-, donde se analizan los conocimientos de Cálculo que poseen, además de la facilidad de aplicación de tales conocimientos. Como se vio anteriormente, los conocimientos de Cálculo son importantes para el ingeniero y no pueden solo cerrarse a problemas de aplicación de fórmulas; y mucho menos deben olvidarse estos conocimientos en etapas superiores de la carrera o al egreso de la misma, ya que tales conocimientos son indispensables para aquellos ingenieros que deseen continuar con sus estudios de posgrado en el área de físico-matemáticas. Sin embargo, no solo en ese ámbito son indispensables, ya que existen nuevos retos en el ámbito laboral, donde podrían ser utilizados los conocimientos del cálculo, por ejemplo, en la mejora de tecnologías. Por lo anterior, llegamos a las siguientes cuestiones: ¿El alumno próximo a egresar de la Ingeniería en Sistemas Computacionales de la ESCOM posee conocimientos sólidos en Cálculo? ¿Si posee dichos conocimientos está preparado para aplicarlos en el ámbito real?

### **Justificación**

Los retos y las características del contexto socioeconómico y tecnológico actual llevan a pensar en un aumento de la formación científica y tecnológica de los ingenieros. Se requerirán más ingenieros para solucionar los problemas, y los problemas cada vez son más complejos, lo que lleva a pensar en una formación científica más sólida. Además para el desarrollo de nuestro país se requiere de ingenieros con una sólida formación para enfrentar los nuevos retos que a nivel mundial se están exigiendo.

El resultado del análisis permite conocer la formación de los alumnos de la ESCOM, y se podrían identificar las deficiencias en conocimientos de Cálculo que presentan los estudiantes, que a su vez pueden ser tomadas en cuenta para mejorar la formación de los Ingenieros en Sistemas Computacionales.

Este artículo deriva del proyecto de investigación con registro en la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP 20164801).

### **Hipótesis**

**Hipótesis alternativa:** Los alumnos de cuarto nivel creen que el conocimiento de Cálculo no tiene utilidad en su formación, ya que han reprobado alguna asignatura relacionada a Cálculo lo que nos hace pensar que le restan importancia a las materias que no van directamente relacionadas a su área carrera.

**Hipótesis nula:** No practicar los conocimientos de Cálculo, genera que más del 20 por ciento de los alumnos de cuarto nivel posean conocimientos sólidos y necesarios para realizar ejercicios complejos.

**Hipótesis estadística:** Más del 50 por ciento de los alumnos de cuarto nivel poseen problemas de aplicación básicos de Cálculo, por falta de actividades constantes de práctica.

### **Objetivos**

#### **Objetivo general:**

Implementar un sitio web como herramienta para mejorar la calidad de los conocimientos de Cálculo de los alumnos de cuarto nivel de la Ingeniería en Sistemas Computacionales de la ESCOM.

#### **Objetivos específicos:**

- Conocer la calidad de los conocimientos de los alumnos de cuarto nivel mediante encuestas y cuestionarios específicos.
- Analizar el nivel de conocimientos de los alumnos mediante los datos estadísticos obtenidos.
- Identificar las deficiencias de conocimientos en los alumnos para preparar material específico. Haciendo énfasis en mejorar la comprensión y aplicación de los conocimientos en situaciones reales.
- Implementar un sitio web con materiales de descarga, así como de información y teoría, para los alumnos.

## Marco teórico- referencia

La modelación matemática es uno de los temas que aparecen en el currículo oculto de los estudios universitarios y que requiere el uso del cálculo, Camarena en [3] menciona que, el egresado debe saber modelar y, en muchos planes y programas de estudio para nada se hace alusión al término "modelación matemática"; en otros currículos, dentro de los objetivos de los programas de estudio, se dice que el alumno deberá saber modelar problemas de otras áreas del conocimiento, y en muy pocos currículos viene este término incluido en el temario de las asignaturas.

En ningún caso se dice como incorporar la modelación matemática a los cursos, ni cómo lograr que los estudiantes modelen situaciones de otras áreas o problemas de la vida cotidiana. De hecho, en la mayoría de las ingenierías, que es donde existe más riqueza en contenidos matemáticos, no existe ninguna asignatura que se aboque a elaborar modelos matemáticos, además, resulta que los profesores de matemáticas sienten que este punto compete a los profesores de los cursos propios de la ingeniería, mientras que estos últimos presuponen que los maestros de matemáticas son quienes deben enseñar al estudiante a modelar fenómenos de la ingeniería.

Por otra parte, otras investigaciones confirman que la enseñanza habitual del cálculo se basa en la transmisión de conocimientos con un énfasis muy marcado en el desarrollo de habilidades algebraicas y se desatiende el discernimiento intelectual para la comprensión de ideas, nociones y conceptos. Tal situación ha sido abordada en diversas investigaciones en los que se muestran desde argumentaciones teóricas hasta propuestas para mejorar la calidad del aprendizaje, las cuales incluyen tanto los conocimientos previos que necesitaría tener un estudiante para tener éxito en el estudio de cálculo, como la elaboración de materiales didácticos. Respecto a esta problemática de Moreno indica que: "*La enseñanza de los principios del Cálculo resulta bastante problemática, y aunque seamos capaces de enseñar a los estudiantes a resolver de forma más o menos mecánica algunos problemas estándar, o bien a realizar algunas derivadas o integrales, tales acciones están muy lejos de lo que supondría una verdadera*

*comprensión de los conceptos y métodos de pensamiento de esta parte de las matemáticas"* [4]. Esto genera problemas importantes ya que el conocimiento generalmente se trata fuera de contextos apropiados. Así, cuando se pretende mostrar a los estudiantes la utilidad de los contenidos que se estudian, a lo más que se llega en un curso común de Cálculo es a resolver problemas de aplicación que se proponen en los textos, que casi nunca corresponden a la realidad, es decir a una aplicación en problemáticas de la vida diaria. Esto tiene consecuencias negativas cuando los que aprenden son estudiantes que en el ejercicio de su profesión requieren de conocimientos y habilidades que les permitan resolver problemas de verdad. Tal es el caso de quienes se preparan en carreras de ingeniería.

En [3] se menciona que *"parte de la problemática en ingeniería es que la matemática se encuentra totalmente desvinculada de las asignaturas de la ingeniería, y la realidad del ingeniero reclama esta vinculación que en materia de educación está en tierra de nadie"*.

Particularmente, en los programas de estudio correspondientes a los cursos de Cálculo para ingeniería se puede leer que su objetivo consiste en proporcionar al alumno los conocimientos fundamentales del Cálculo que serán utilizados en la interpretación, planteamiento y resolución de problemas específicos de su carrera; sin embargo, ni en dichos programas ni en los textos que se sugieren para los cursos son mencionados o tratados. En [2] se expresa que en comunicaciones personales con profesores que imparten dichos cursos señalan que, si bien tienen alguna idea, no conocen problemas o situaciones específicas de las carreras profesionales; por tanto, se limitan a enseñar, cuando mucho, el tipo de aplicaciones contenidas en los textos que llevan los alumnos.

Los alumnos de los últimos semestres de la carrera de ISC deben poseer los conocimientos suficientes y estar capacitados para establecer la modelación matemática de determinados eventos contextualizados con los que se enfrentará en su vida laboral y profesional, en especial aquellos estudiantes que continuaran con estudios de posgrado.

Artigue [5] señala que numerosas investigaciones realizadas muestran, con convergencias sorprendentes, que si bien se puede enseñar a los estudiantes a realizar de forma más o menos mecánica algunos cálculos de derivadas y primitivas y a resolver algunos problemas estándar, se encuentran grandes dificultades para hacerlos entrar en verdad en el campo del cálculo y para hacerlos alcanzar una comprensión satisfactoria de los conceptos y métodos de pensamiento que son el centro de este campo de las matemáticas. Estos estudios también muestran de manera clara que, frente a las dificultades encontradas, la enseñanza tradicional y, en particular, la enseñanza universitaria, aún si tiene otras ambiciones, tiende a centrarse en una práctica algorítmica y algebraica del cálculo y a evaluar en esencia las competencias adquiridas en este dominio. Este fenómeno se convierte en un círculo vicioso: para tener niveles aceptables de éxito, se evalúa aquello que los estudiantes pueden hacer mejor, y esto es, a su vez, considerado por los estudiantes como lo esencial, ya que es lo que se evalúa. Esta problemática condiciona el ambiente en el aula, la disposición de los estudiantes para aprender y su actitud ante los nuevos conocimientos. Saber matemáticas significa, para los alumnos, tener alguna habilidad en la resolución de ecuaciones, desarrollar procedimientos, aplicar fórmulas y métodos. Rara vez un estudiante concibe a las matemáticas como algo que le pueda ser útil más allá de eso.

Al respecto, en [3] se menciona que "*La matemática en contexto: ayuda al estudiante a construir su propio conocimiento de una matemática con significado, con amarres firmes y no volátiles; refuerza el desarrollo de habilidades matemáticas, mediante el proceso de resolver problemas vinculados con los intereses del alumno...*" De esta manera, atendiendo a la idea de que los estudiantes de ingeniería serán en su futura vida profesional usuarios de la matemática, y que requieren en su formación de situaciones que les muestren la utilidad de los conocimientos matemáticos en su área. Esta idea está muy relacionada con lo que menciona Zuñiga [2], acerca de lo que es el aprendizaje significativo: si el estudiante tiene una disposición para relacionar de manera significativa el nuevo material de aprendizaje con su estructura existente de

conocimiento, y si la tarea de aprendizaje consiste en sí de un material razonable o sensible y si puede relacionarse de manera sustancial y no arbitraria con la estructura cognoscitiva del estudiante particular.

Sin embargo, para los fines de esta investigación es elemental considerar que prácticamente no se han realizado estudios sobre el nivel de conocimientos de cálculo en el contexto de los alumnos de cuarto nivel de la ingeniería en sistemas computacionales de la ESCOM. Es importante analizar el nivel y de esta forma detectar las deficiencias que se pudieran encontrar y contrarrestarlas con actividades extra, asesorías, etc.; que estén relacionadas con el área de conocimientos de la carrera y de esta manera como se expresa en [2] y [3] se requiere captar el interés de los alumnos y con ello reforzar los conocimientos en esta área.

### **3. Resultados**

Se diseñó y aplicó un cuestionario a una muestra de 20 estudiantes de nivel superior quienes estaban culminando su carrera de ingenieros en sistemas computacionales con el objetivo de darnos una idea de cómo se encuentra su nivel en matemáticas y cómo fue su desempeño en los primeros niveles de la carrera. El cuestionario se presenta en la tabla 1.

Los resultados fueron concentrados en tablas 2 a 11 y se muestran las gráficas 1 a 10 correspondientes a cada pregunta.

#### **Análisis de resultados**

De acuerdo a los resultados arrojados por las encuestas aplicadas nos damos cuenta que la materia de ciencias-básicas que más reprobaban los estudiantes es análisis vectorial, seguida de matemáticas avanzadas, así también podemos observar que las materias menos reprobadas son probabilidad y estadística, cálculo aplicado y física. También cabe resaltar que 18 de los 20 estudiantes encuestados han reprobado al menos dos materias y solo un estudiante afirmó no haber reprobado ninguna materia de matemáticas.

Tabla 1 Cuestionario.

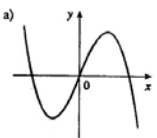
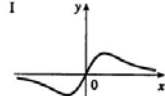
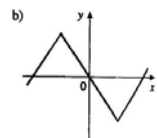
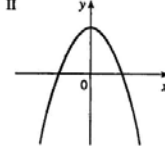
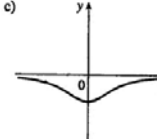
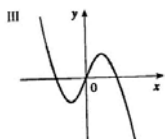
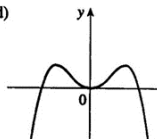
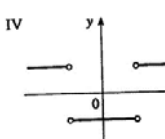
<p>1. ¿Qué materia de formación científica-básica(Matemáticas) has reprobado?                  a) Cálculo f) Análisis Vectorial                  b) Cálculo Aplicado g) Ecuaciones Diferenciales                  c) Matemáticas Discretas                  d) Física h) Matemáticas Avanzadas                  e) Álgebra Lineal i) Probabilidad y Estadística</p>	<p>2. Escribe al menos dos fórmulas de integrales</p>
<p>3. Menciona en qué nivel consideras que te encuentras en cuanto a conocimientos de Cálculo. En una escala del 1 al 9, en donde 1 es nada de conocimientos y 9 se refiere a un nivel alto de conocimientos.</p>	<p>4. Escribe al menos dos fórmulas de derivadas.</p>
<p>5. ¿Consideras que las materias que requieren los conceptos de Cálculo son complicadas?</p>	<p>6. Calcula la derivada de la función en el punto indicado.  <math>y = x^2 - 4x + 1</math> en <math>x = 1</math> y en <math>x = 2</math></p>
<p>7. ¿Crees que es necesario que se sigan impartiendo materias de matemáticas en los últimos semestres?                  Si No</p>	<p>8. Se realizan estudios para poder purificar la atmósfera de la Tierra. Si una compañía a través de sus fábricas y durante un período de 18 horas diarias para combatir el "smog", liberará en la atmósfera cada una de sus fábricas, toneladas de una sustancia química determinada por la función: <math>f(x) = 0.2x^2 + 2x</math>                  ¿Cuál es la liberación de cambio instantánea de toneladas de sustancia química exactamente 8 horas después?</p>
<p>9. ¿Qué tan importantes fueron las materias de matemáticas en tu desarrollo académico?                  Mucho Poco Nada</p>	<p>10.10. Relaciona la gráfica de cada función con la gráfica de su derivada. Da la razón de tu selección.</p> <div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;"> <p>a) </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>I </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>b) </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>II </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>c) </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>III </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>d) </p> </div> <div style="width: 50%;"> <p>IV </p> </div> </div>

Tabla 2 ¿Qué materia de formación científica-básica (Matemáticas) has reprobado?

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
Cálculo	2	2	5.2%	5.2%
Cálculo Aplicado	1	3	2.6%	7.8%
Matemáticas Discretas	7	10	18.4%	26.2%
Física	1	11	2.6%	28.8%
Álgebra Lineal	4	15	10.5%	39.3%
Análisis Vectorial	9	24	23.6%	62.9%
Ecuaciones Diferenciales	5	29	13.2%	76.1%
Matemáticas Avanzadas	8	37	21.0%	97.1%
Probabilidad y Estadística	0	37	0.0%	97.1%
Ninguna	1	38	2.6%	99.7%

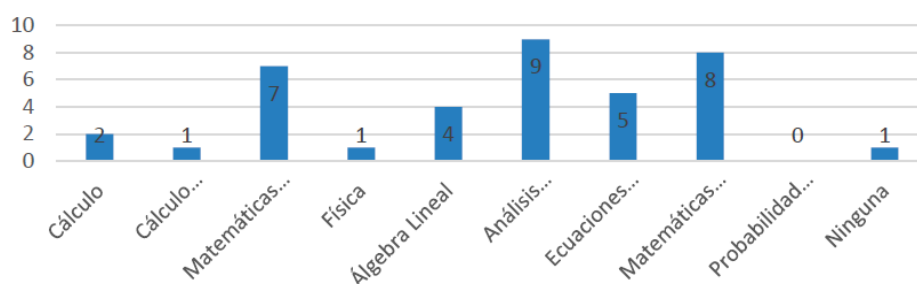


Figura1 Análisis de resultados de la primera pregunta de la encuesta.

Tabla 3 Resultados del nivel de conocimientos en cálculo.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
1	0	0	0%	0%
2	0	0	0%	0%
3	0	0	0%	0%
4	2	2	10%	10%
5	3	5	15%	25%
6	6	11	30%	55%
7	5	16	25%	80%
8	2	18	10%	90%
9	2	20	10%	100%

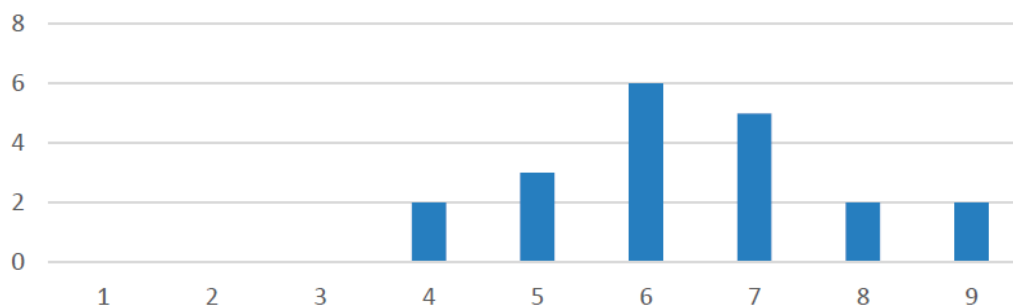


Figura 2 Análisis de la segunda pregunta de la encuesta.



Tabla 4 Resultado acerca de la complicación de las materias que requieren cálculo.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
SI	13	13	65%	65%
NO	7	20	35%	100%



Figura 3 Análisis de la tercera pregunta de la encuesta.

Tabla 5 Resultados acerca de la necesidad de matemáticas en los últimos semestres.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
SI	8	8	40%	40%
NO	12	20	60%	100%

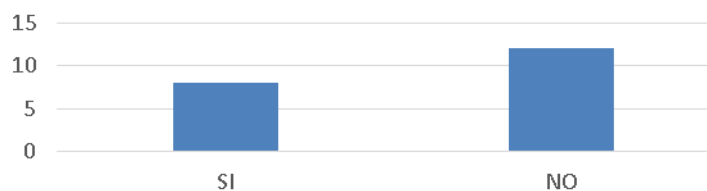


Figura 4 Análisis de la cuarta pregunta del cuestionario.

Tabla 6 Resultados acerca de la importancia de las matemáticas desarrollo académico.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
Mucho	14	14	70%	70%
Poco	6	20	30%	100%
Nada	0	20	0%	0%

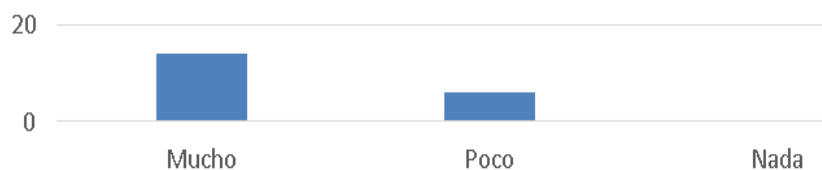


Figura 5 Análisis de la quinta pregunta del cuestionario.

Tabla 7 Resultado escribe al menos dos fórmulas de integrales.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
Escribieron 2	7	7	35%	35%
Escribieron 1	7	14	35%	70%
No escribieron nada	6	20	30%	100%

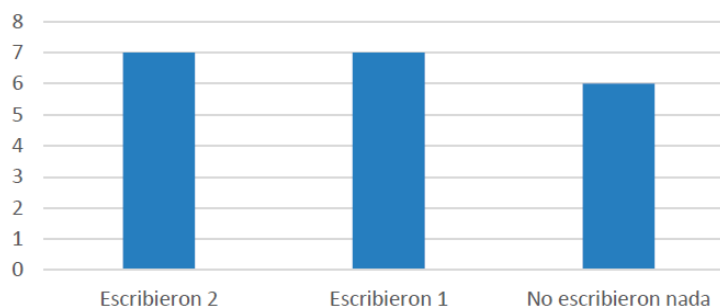


Figura 6 Análisis de los ejercicios de integrales.

Tabla 8 Resultado escribe al menos dos fórmulas de derivadas.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
Escribieron 2	6	6	30%	30%
Escribieron 1	8	14	40%	70%
No escribieron nada	6	20	30%	100%

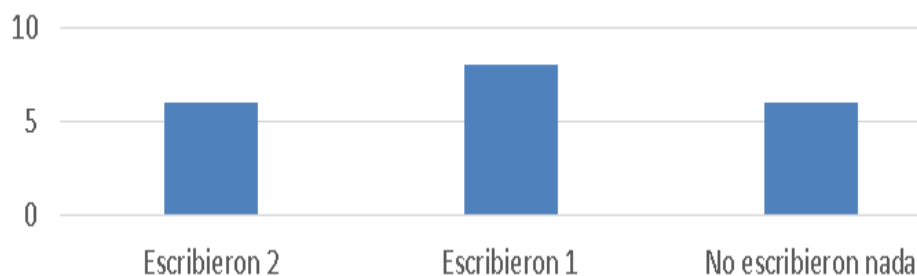


Figura 7 Análisis de los ejercicios de derivadas.

Tabla 9 Resultados del ejercicio de cálculo diferencial.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
La resolvieron	3	3	15%	15%
No la resolvieron	17	20	85%	100%

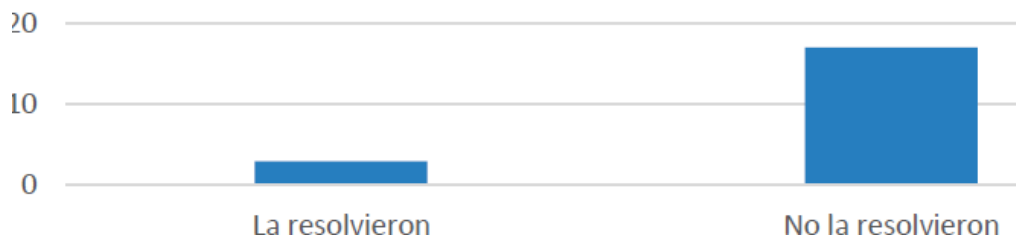


Figura 8 Análisis de ejercicios de derivación.

Tabla 10 Resultados del ejercicio de cálculo diferencial (razón de cambio).

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
La resolvieron	4	4	20%	20%
No la resolvieron	16	20	80%	100%

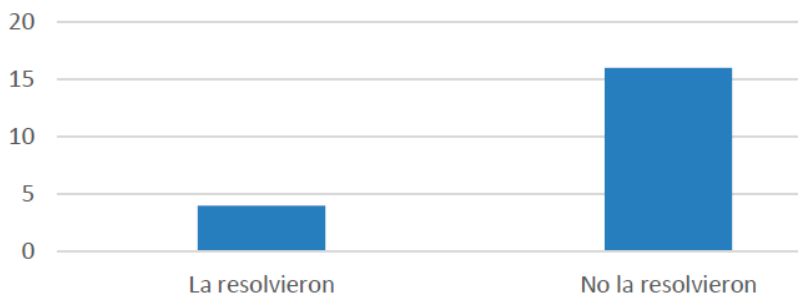


Figura 9 Análisis de los ejercicios de integración.

Tabla 11 Resultados del ejercicio de relacionar gráficas.

Respuestas	Resultados	Absoluta Acumulada	Relativa	Relativa Acumulada
Una correcta	1	1	5%	5%
Dos correctas	2	3	10%	15%
Tres correctas	1	4	5%	20%
Todas correctas	16	20	80%	100%

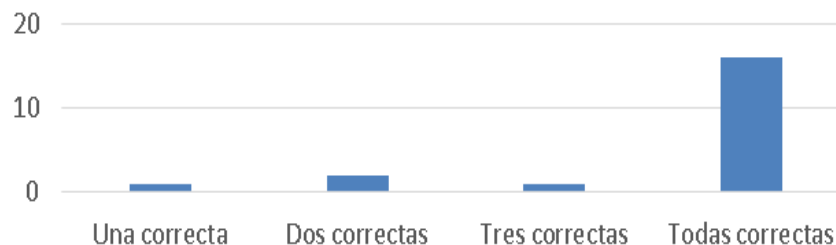


Figura 10 Análisis del último ejercicio de la encuesta.

Se obtuvo que el 65% de los estudiantes encuestados dijeron que las materias de Cálculo son complicadas y varios dijeron que esto se debe principalmente a la forma de evaluar y de enseñar de los profesores. Un 60% de los estudiantes afirmaron que no es necesario que se sigan impartiendo en los últimos niveles de la carrera materias relacionadas con matemáticas ya que mencionaron que no son necesarias para la carrera, contrario al 40% que afirmó que si es necesario para la formación de un ingeniero ya que te da una mayor habilidad, sin embargo un 70% de los estudiantes concluyen que las matemáticas fueron de mucha importancia para su desarrollo académico y el otro 30% dijeron que solo fue poco lo contribuyeron las matemáticas a su desarrollo.

De los pequeños ejercicios que se pusieron en las encuestas podemos rescatar que efectivamente los estudiantes en los últimos niveles empiezan a olvidar los conocimientos adquiridos en las materias de Cálculo ya que solo el 30% de los estudiantes lograron escribir las dos fórmulas de derivadas que se solicitaban, el 40% escribió solo una y el 30% restante no escribió ninguna. Ocurrió algo similar con las fórmulas de integrales.

Principalmente en el ejercicio de calcular la derivada de la función en el punto indicado y en la resolución del problema de razón de cambio instantánea, nos percatamos que los estudiantes no lograron construir el concepto de derivada pues sólo el 15% en el primer caso y el 20% en el segundo caso lo tuvieron correcto, es decir el 85% y el 80% no recuerdan lo trabajado en sus primeros semestres de la carrera. Aunque en el ejercicio de relacionar las gráficas el 80% de los estudiantes contestaron acertadamente a los 4 ejercicios que se pusieron. Esto muestra que lo visual es un apoyo fuerte que permite a los estudiantes recordar lo trabajado en semestres anteriores.

En conclusión podemos decir que en los últimos niveles de la carrera de sistemas computacionales son pocos los estudiantes que aún recuerdan los conocimientos adquiridos en los primeros niveles.

En general las matemáticas se les complican a muchos estudiantes debido principalmente al trabajo realizado por los profesores, el cual es en la mayoría de los casos mecánico mediante el tratamiento de fórmulas, aunque también les

resultan difíciles porque no cuentan con una base sólida antes de ingresar a la carrera. Por último. Es importante señalar que la mayoría coincidió en que las matemáticas les son de mucha ayuda en su desarrollo académico, esto debido a que les ayudó al desarrollo de un razonamiento abstracto lo cual es fundamental en la formación de todo ingeniero.

Una forma en que se ha considerado apoyar el aprendizaje de los estudiantes en matemáticas, y en específico en la materia de Cálculo es con el desarrollo del sitio web móvil, el cual contiene las siguientes características:

- Repositorio y control de versiones de trabajos escolares.
- Sistema de trabajos en equipo con monitorización de trabajo por integrante. (Entre los integrantes se podrán asignar roles, metas, tiempos y el profesor podrá revisar el trabajo casi en tiempo real pudiendo hacer anotaciones al mismo proyecto para su mejoramiento).
- Sistema de encargo de tareas.
- Sistema de entrega de tareas y proyectos. (Control de tiempos, calidad)
- Algoritmos de control de copias (Revisa los textos buscando coincidencias, si encuentra se notifica al profesor para realizar un mejor chequeo y tomar una decisión pertinente).
- Mensajería instantánea entre profesor – alumno, alumno–alumno, profesor–profesor.
- Foros, sección de preguntas, área de noticias.
- Temarios, asesorías, apuntes del profesor, videos de apoyo, audios de apoyo.
- Clases y asesorías por streaming.
- Evaluación de profesores.
- Calendario escolar.
- Calendario de clases del alumno.
- Alarmas y recordatorios de tareas, trabajos y exámenes.
- Sistema de evaluaciones de simulacro y evaluaciones a distancia.
- El sistema podrá ser usado desde cualquier dispositivo móvil por medio de un explorador web o la aplicación oficial.

## **4. Discusión**

Conforme al estudio e investigación realizada se alcanzaron los objetivos planteados como es analizar el nivel de conocimiento de los alumnos, conocer que conocimientos tienen presentes los alumnos, además de implementar un sitio web donde se pueden descargar varias guías, ejercicios, links donde se pueden encontrar tutoriales que son de gran ayuda.

El objetivo que no se pudo lograr del todo es en relación a los conocimientos en los que se tienen deficiencias para así poder enfocarnos a realizar la página web, decidimos orientarnos con el plan de estudios de ESCOM para desglosar todos los temas que serían de ayuda a los alumnos.

### **Trabajo a futuro**

Tras analizar los resultados de esta investigación se puede asegurar que la falta de práctica de los alumnos de niveles superiores, hace que los conocimientos que se habían adquirido se pierdan.

Por lo tanto el trabajo aún tiene grandes alcances y se puede aplicar este tipo de implementaciones a otras áreas, no solo a Cálculo ya que con lo visto en las encuestas, muchos de los participantes han reprobado materias de ciencias básicas.

Esta investigación tiene como objetivo ayudar a los alumnos en general a través de un sitio web, donde podrán seguir practicando ejercicios de Cálculo y Cálculo Aplicado, para ello la página va a estar actualizada con ejercicios, para que los alumnos no pierdan ese conocimiento adquirido que podrán utilizar posteriormente en su profesión.

La investigación puede dar pauta a que se realicen más encuestas de otras materias de ciencias básicas, por ejemplo física, análisis vectorial, matemáticas discretas, entre otras, con el fin de prevalecer los conocimientos de los alumnos y que su nivel de egreso sea aún mayor.

Así mismo, el sitio web ya creado, podría desarrollarse para implementar estas nuevas materias y que se vuelva un sitio confiable y seguro de consulta. De igual manera, en un futuro este sitio se podría implementarse en el nivel medio superior

incluso en escuelas secundarias con tomando en cuenta sus materias y conocimientos para poder mejorar el aprendizaje de los alumnos.

## **5. Conclusiones**

Se pudo observar que los estudiantes de niveles avanzados, no recuerdan cómo hacer un ejercicio básico de cálculo y es bien sabido que las matemáticas en general y el Cálculo, en particular, están presentes en muchas situaciones en la vida cotidiana, así que se debe concientizar a los alumnos a trabajar en estas áreas no sólo en la parte algorítmica, sino también en la construcción de los conceptos.

Es fundamental hacerle ver a los profesores que imparten las materias de matemáticas que incluyan en sus clases actividades y problemas relacionados con la carrera de los estudiantes, como es el caso abordado en la presente investigación, la carrera de Sistemas Computacionales.

La implementación de un sitio de un sitio web que contenga temas, formularios, guías y otras herramientas puede ayudar al estudiante en sus materias de matemáticas. Con el análisis estadístico realizado se comprobaron las hipótesis del trabajo.

## **6. Referencias**

- [1] National Academy of Engineering, 14 Grand Challenges for Engineering in the 21st Century. <http://www.engineeringchallenges.org/8996.aspx>. Mayo de 2015.
- [2] Zúñiga L. "El cálculo en carreras de ingeniería: un estudio cognitivo". *Relime*. Vol.10. No.1. 2007.
- [3] P. Camarena, T. Trejo. "Las matemáticas en la formación de un ingeniero: una propuesta metodológica". *Revista de Docencia Universitaria*. Vol.11. Número extraordinario. 2006.
- [4] El papel de la didáctica en la enseñanza del cálculo: evolución, estado actual y retos futuros. El papel de la didáctica en la enseñanza del cálculo: evolución, estado actual y retos futuros. <http://funes.uniandes.edu.co/1325/>.

- [5] M. Artigue, "Learning Mathematics In A Cas Environment: The Genesis Of A Reflection About Instrumentation And The Dialectics Between Technical And Conceptual Work". *International Journal of Computers for Mathematical Learning*. Vol. 7. 2002. Pp. 245-274.

## **7. Autores**

Dra. Elena Fabiola Ruiz Ledesma. Doctorado y maestría en Ciencias. Especialidad Matemática Educativa. Egresada de Cinvestav. IPN. Licenciada en Matemáticas. ENSM.

M.C. Enrique Alfonso Carmona García, por la Universidad de Pinar del Río, Cuba en Sistemas de Telecomunicaciones en 2015. Graduado de Ingeniería en Ciencias Informáticas en la Universidad de las Ciencias Informáticas de La Habana, Cuba, en 2010.

M.C. Ángel Salvador Montiel. Maestría en Matemática Educativa. Cinvestav. IPN. Licenciatura en Matemáticas. ESFM. IPN.



# **PORTAL WEB COMO MEDIO DE CONSULTA DE SOFTWARE DE APLICACIÓN PARA EL DESARROLLO DE MATERIALES EDUCATIVOS EN EL PROGRAMA DE LA MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN PARA LA EDUCACIÓN DE LA UAEH**

***Verónica Martínez Lazcano***

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*vlazcano@uaeh.edu.mx*

***Mariel Montaña Montiel***

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*leiramf\_@hotmail.com*

***María de los Ángeles Alonso Lavernia***

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*marial@uaeh.edu.mx*

## **Resumen**

La Maestría en Tecnologías de la Información para la Educación (MTIE) que se imparte en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) ofrece a los profesionistas dedicados a la educación y enfocados a los aspectos tecnológicos una formación de excelencia, con el propósito de que puedan desarrollar un proceso de enseñanza-aprendizaje de calidad, considerando como uno de los ejes de formación la creación de materiales didácticos digitales mediante diversos software de aplicación, mismos que enriquecerán su labor docente.

El desarrollo que se presenta en este documento pretende facilitar la labor de búsqueda de alternativas en software enfocado al desarrollo de recursos didácticos. Se describe el desarrollo de un portal web para los estudiantes de la MTIE, el cual tiene la finalidad de conjuntar en un mismo sitio aplicaciones que utilizarán durante los periodos de formación destinados a la creación de material

educativo. Siendo esto último una característica relevante del portal dada la diversidad de herramientas de software de aplicación que existen en la actualidad y que por falta de tiempo no se pueden consultar.

Este apoyo para los estudiantes, se complementará con otros elementos de ayuda como manuales y tutoriales que les permita aprender a instalar y utilizar la herramienta que deseen para crear sus recursos.

**Palabra(s) Clave(s):** Creación de material educativo, software de aplicación, sugerencia de herramientas de software, tecnología aplicada a la educación.

## **1. Introducción**

Las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) han tenido un gran impacto en los diferentes sectores de la sociedad, al ser utilizados en el desarrollo de los portales o sitios web que se encuentran alojados en Internet, permitiendo compartir información y/o servicios de cualquier tipo, tales como, transferencias bancarias, comercio electrónico, redes sociales, música y videos, entre otros.

Uno de los sectores más beneficiados es sin duda el sector educativo, ya que gracias a la inclusión de la tecnología en los métodos de enseñanza y aprendizaje aumenta de forma significativa la eficiencia y productividad tanto de los docentes como de los estudiantes, contribuyendo además en su desarrollo profesional, así como en la eficiencia del sistema educativo [16].

Considerando las ventajas que ofrecen las TIC para el desarrollo de materiales educativos y multimedios en general, el programa de posgrado MTIE de la UAEH, incorpora en la formación de los estudiantes diversas aplicaciones de software de este tipo en ocho de las asignaturas que la integran [9].

No obstante, el periodo dedicado a una asignatura, no permite que los estudiantes conozcan la variedad de software que existe en la temática de dicha asignatura, lo cual implica que de manera independiente, los estudiantes busquen y utilicen otras alternativas en diferentes sitios web causando pérdida de tiempo y falta de interés sobre todo en aquellos estudiantes que no cuentan con suficientes habilidades en el manejo de la computadora.

Por tal razón, se propone la creación de un portal web que integre, en un mismo sitio, software de aplicación susceptible a utilizar en cada una de las ocho asignaturas de la MTIE que incorpore diferentes elementos, tales como, características principales, material de ayuda, actividades y evaluaciones, entre otros. La finalidad de este portal es que los alumnos de la MTIE, puedan encontrar de una manera rápida el software que se utiliza en el posgrado y aplicaciones similares a éstas, teniendo diferentes opciones de aplicación y así elegir la que más se adecúe a sus necesidades.

## **2. Antecedentes**

El uso y aplicación de la tecnología sirven como apoyo en los diferentes ámbitos, tanto los profesionistas como el público en general utilizan una infinidad de software acorde a sus necesidades y en ocasiones, a su grado escolar, por ello es de gran importancia mencionar como antecedentes algunos trabajos realizados con esta intención.

En 1993, el bibliotecario Scott Swedorski desarrolló un sitio web denominado Tucows, acrónimo de la última colección de Winsock Software, la idea surgió porque Scott notó en su área de trabajo el gran interés que los usuarios tenían por la World Wide Web. Tucows se denominó como el primer portal web en ofrecer la descarga de software de forma freeware (software gratuito) o shareware (versión de prueba gratis) [15].

En la estructura del portal muestra al usuario software para los diferentes sistemas operativos que a su vez están distribuidos en categorías generales. En la actualidad, Tucows ofrece más servicios, de los cuales destacan la venta e integración de dominios y telefonía móvil denominado *Ting*.

Otro portal web que permite el acceso a software de aplicación es SnapFiles, mismo que fue desarrollado en el año de 1997 y el cual anteriormente se denominaba *WebAttack.com*. SnapFiles se dedica exclusivamente a la descarga de software del sistema operativo Windows, en donde se incluye una breve descripción del mismo y un enlace al sitio web de cada uno de los desarrolladores. Este sitio no desarrolla los programas, cada producto contiene un enlace al sitio de

la compañía de software o desarrollador, SnapFiles revisa, evalúa y categoriza el software que proporciona al usuario [12].

Otro desarrollo de portal web con intención de ofrecer software es llamado *Softonic*, el cual fue creado por Tomás Diago en el año de 1997 en Barcelona, como parte de su proyecto final de la universidad y en el año 2013 obtuvo un récord de 6 millones de descargas por día. El objetivo de este portal es permitir a los usuarios descubrir y obtener el mejor software y/o aplicación (App) que existe, además cuenta con una diversidad de contenido como noticias, artículos, reseñas, tutoriales y videos en diferentes idiomas. En la actualidad, Softonic tiene presencia global y un alcance internacional, ya que cuenta con oficinas en Europa, Asia y América, contiene programas para las diferentes plataformas informáticas y cuenta con subcategorías tanto de índole educativa como de ocio y entretenimiento [13].

Indudablemente, otra de las aplicaciones de la tecnología en la educación son los denominados Massive Open Online Courses (MOOC) creados desde sus inicios como una herramienta de aprendizaje colaborativa, se consideran como una evolución o una simple moda. Estos cursos contienen lo tradicional de los cursos en línea, es decir, un programa, objetivos de aprendizaje, materiales, videos, actividades y distintas evaluaciones, entre otros aspectos, además de ser en su mayoría gratuitos y utilizados por el público en general. Los sitios web que ofrecen cursos MOOC son: Coursera<sup>1</sup>, Udacity<sup>2</sup>, edX<sup>3</sup>, Khan Academy<sup>4</sup>, Udemy<sup>5</sup>, Codecademy<sup>6</sup>, Lynda.com<sup>7</sup>, SkilledUp<sup>8</sup>, Academic Earth<sup>9</sup>, Saylor.org<sup>10</sup>, Canvas Network<sup>11</sup> y MiríadaX<sup>12</sup>.

Los cursos MOOC han generado nuevas metodologías, tecnologías y formas de organizar la educación, esto es, su manera de realizarse obliga a eliminar la figura

---

<sup>1</sup> <https://www.coursera.org/>

<sup>2</sup> <https://www.udacity.com/>

<sup>3</sup> <https://www.edx.org/>

<sup>4</sup> <https://www.khanacademy.org/>

<sup>5</sup> <https://www.udemy.com/>

<sup>6</sup> <http://www.codecademy.com/>

<sup>7</sup> <http://www.lynda.com/>

<sup>8</sup> <http://www.skilledup.com/>

<sup>9</sup> <http://www.academicearth.org/>

<sup>10</sup> <http://www.saylor.org/>

<sup>11</sup> <https://www.canvas.net/>

<sup>12</sup> <http://miriadax.net/>

tradicional de un tutor, hace uso de videos grabados de manera doméstica, no requieren de un costoso sistema de gestión de aprendizaje para su desarrollo, los usuarios no buscan una matrícula ni una acreditación oficial, no requiere de un sistema tradicional de inscripción y acreditación, lo anterior debido a que los MOOC se inician, desarrollan y culminan haciendo uso sólo de Internet [3].

### **3. Arquitectura de la aplicación**

Considerando entonces la idea de ofrecer un espacio en la Web que brinde una diversidad de recursos, se desarrolla un portal web que debe cumplir con los siguientes requisitos: tener una estructura ordenada, de fácil acceso pero sobre todo amigable e intuitiva haciendo uso de las características básicas y avanzadas que debe tener un sitio web [10], pues está destinado principalmente a usuarios no especialistas en el área de computación, quienes deben encontrar lo que necesitan sin salir del mismo [2].

El portal está diseñado para todas las asignaturas de la Maestría en Tecnologías de la Información para la Educación que requieran el uso de una herramienta informática. Está compuesto por un elemento principal denominado *Módulo de Inicio* y por tres módulos secundarios que son: *Asignaturas*, *Sistemas Operativos* y *Software de Aplicación*, los cuales integran las opciones necesarias para la consulta de software y otras secciones adicionales que servirán como apoyo al usuario durante su estancia en el portal. La figura 1 muestra la organización de los módulos de este portal y cada uno de estos, será descrito brevemente en las próximas secciones.

### **4. Metodología de desarrollo utilizada**

Para el desarrollo del proyecto tecnológico se utilizó la metodología denominada *Metodología para creación de sitios web*, creada por Dely Maybel Gil Álvarez y un equipo de trabajo de la Universidad Tecnológica de Valencia. Es una metodología híbrida, basada en las fases para el desarrollo de sitios web de la obra "Studio MX Creación de Sitios Web" de Green, Chilcott y Flick [5, 6].



Figura 1 Arquitectura del portal.

Su proceso se divide en siete fases, las cuales a su vez cuentan con tareas específicas para el desarrollo del sitio web. Las fases de la metodología son: Análisis, Planificación, Contenido, Diseño, Programación, Testeo, Mercadeo y Publicidad.

Se seleccionó esta metodología porque posee las etapas necesarias para el desarrollo del portal web, dentro de las cuales se establecen los objetivos que debe tener la aplicación y lo que se pretende alcanzar con ella. Además, es una metodología flexible y fácil de utilizar ya que cada fase explica de manera específica lo que se debe realizar.

### Fase de Análisis

En esta fase se toma en cuenta el objetivo de la Maestría en Tecnologías de la Información. Asimismo, se realiza la selección de usuarios, el cual está dirigido a los estudiantes de la MTIE, quienes cuentan con diferentes perfiles educativos. Su contenido está enfocado al software de aplicación que se utiliza en las asignaturas

del posgrado y herramientas similares a éstas. Otro de los aspectos importantes, son las expectativas de los usuarios, las cuales corresponden a que durante el transcurso del posgrado, el estudiante aprenderá a realizar materiales multimedia que servirán como apoyo en su labor docente, mediante una diversidad de software de aplicación.

Finalmente, se toma en cuenta los resultados que se pretenden obtener con la creación del portal web, definiendo su propósito, el cual es contar con un espacio donde el estudiante encuentre los elementos necesarios para el desarrollo de materiales educativos sin la necesidad de buscar en diversos sitios web.

### **Fase de Planificación**

Para el proceso de organización, se necesitaron establecer criterios y requisitos que determinan la estructura y contenido del portal web, estos son:

- **Software:** para el desarrollo del portal web y sus elementos, fue necesario contar con herramientas especializadas en ese sector, las cuales se mencionan a continuación.
- **Editores de páginas web:** utilizados para la construcción, diseño y edición del portal web. En este caso se utilizará como base el programa Adobe Dreamweaver<sup>13</sup>.
- **Programas de diseño:** permiten la edición y creación de multimedios, como imágenes, videos, audio y animaciones, entre otros. Para este desarrollo tecnológico se utilizaron las herramientas, Adobe Photoshop<sup>14</sup>, Adobe Illustrator<sup>15</sup> y Pixlr Express<sup>16</sup>.
- **Lenguajes de programación:** programas especializados en el desarrollo del portal web mediante codificación, en este caso se utilizaron los lenguajes, HTML, CSS y Java Script [7,8,18].
- **Navegadores:** son programas o aplicaciones que permitirán visualizar el portal. Es necesario contar con las versiones más recientes para tener una

---

<sup>13</sup> <https://www.adobe.com/mx/products/dreamweaver.html>

<sup>14</sup> <https://www.adobe.com/mx/products/photoshop.html>

<sup>15</sup> <https://www.adobe.com/mx/products/illustrator.html>

<sup>16</sup> <https://pixlr.com/express/>

óptima navegación, algunos ejemplos son, Google Chrome, Internet Explorer, Mozilla Firefox, Safari y Opera [14].

- Gestor FTP: permite alojar el portal web en un servidor para ser utilizado en la red.

## **Benchmarking**

Para el desarrollo tecnológico propuesto fue necesario consultar y evaluar páginas web similares, con la finalidad de crear un producto competitivo y de calidad. Entre los sitios web comparados se encuentran los siguientes:

- **Bananasoft:** es un portal que recopila software y herramientas de trabajo gratuitas, las cuales están clasificadas por áreas profesionales, su objetivo es brindar a los usuarios las opciones necesarias para mejorar y optimizar sus labores profesionales [1].
- **Uptodown:** es un portal web especializado en la descarga de software legal para varios sistemas operativos, creado en el año 2002 en España. Se enfoca principalmente en el sistema Android, por lo que cuenta con más de 30,000 aplicaciones en formato APK [17].
- **PortalProgramas:** es un portal web que recopila software del sistema operativo Windows, su objetivo principal es ofrecer los programas más recientes e interesantes del mercado y permitir su descarga de manera fácil y sencilla. Cuenta con una comunidad en donde permite que los usuarios opinen, voten y guarden sus programas favoritos, con la finalidad de compartir sus experiencias al utilizarlos lo cual aporta mucho valor al portal [11].
- **Navegación:** el portal está compuesto por diferentes páginas web, las cuales a su vez están relacionadas entre sí de una manera ordenada, con el propósito de que los usuarios puedan interactuar con la aplicación de una forma fácil y sencilla.

La estructura de navegación de este portal es de tipo jerárquica, ya que está compuesta por diferentes módulos y secciones que permiten al usuario moverse fácilmente y tener el control completo de la navegación. En la



figura 2 se muestran las relaciones que tendrán las páginas web dentro del portal.

- **Inversión:** el costo financiero que contiene el desarrollo de este portal es prácticamente nulo ya que se creó con software gratuito o versiones de prueba. En cuanto al hospedaje web y dominio que requiere, se pretende que esté alojado en el servidor local del Centro de Innovación para el Desarrollo y la Capacitación en Materiales Educativos (CIDECAE) que pertenece a la misma institución [4].
- **Beneficios:** la creación de este portal web es de carácter exclusivamente educativo sin fines económicos y está diseñado como una herramienta de apoyo para los estudiantes de la MTIE, su principal beneficio es dar a conocer las mejores aplicaciones para el desarrollo de materiales y los recursos necesarios para su aprendizaje.



Figura 2 Estructura de navegación.

### Fase de Contenido

El contenido es el elemento primordial del portal web, ya que describe su funcionalidad, además determina la cantidad de usuarios que ingresen, su permanencia y su regreso.

La información que formará parte del sitio web está compuesta por tres elementos diferentes, dentro de los cuales se le informa al usuario lo que podrá visualizar durante su navegación. La clasificación de dichos grupos se describe a continuación:

- **Asignaturas MTIE:** como se mencionó anteriormente, el posgrado utiliza software de aplicación en ocho asignaturas y el portal está integrado por éstas. Además, como información adicional se muestra el objetivo general de cada una de ellas, con el fin de que los estudiantes identifiquen la meta que se pretende alcanzar al terminar el curso.
- **Características del software:** el contenido principal del desarrollo es el software de aplicación ya que es la razón de ser del portal web, las secciones que forman parte de este elemento se describen en el módulo de software y se eligieron con el propósito de dar a conocer su funcionalidad y los recursos para su aprendizaje.
- **Información de interés:** para que el portal web sea un espacio agradable y accesible para los usuarios, se integró información adicional que transmite mensajes sobre las funciones del portal.

La información que se seleccionó para el portal web, fue pensada en los usuarios que lo ocuparían, con el propósito de satisfacer sus necesidades y proporcionarles los elementos necesarios para su uso.

### **Fase de Diseño**

Una vez realizada la planificación y definidos los contenidos de portal web, es necesario determinar los elementos necesarios para el portal web, los cuales se describen a continuación:

- **Tecnología multimedia:** el portal cuenta con diversos elementos en su diseño, dentro de los cuales se destacan imágenes, animaciones y texto, cada uno de ellos se enfoca en temas de tecnología, software y educación, con la finalidad de que se pueda visualizar el objetivo del portal.
- **Interacción:** la interacción del portal se realizó pensando en los usuarios, ya que es práctico, sencillo y fácil de utilizar.
- **Estructura:** para el portal web, se organizaron los elementos de acuerdo a los contenidos que lo integran. Se utilizan dos tipos diferentes de diseño, tanto en el módulo de inicio como en el módulo de asignaturas.

- Módulo de Inicio: para este módulo se consideró un diseño con una estructura estándar y está compuesto por: cabecera, carrusel de imágenes, contenido y pie de página.
- Cabecera: en este apartado se encuentran dos elementos, compuestos por el logo o nombre del portal en la posición izquierda, el cual permitirá regresar a la página principal desde cualquier sección y el menú principal en la posición derecha, formado por las secciones principales y en algunos casos se desplegarán submenús.
- Carrusel de imágenes: proporciona al usuario diferentes imágenes alusivas a la tecnología, al software de aplicación y a la educación, en donde además cuenta con mensajes informativos.
- Contenido: en este apartado se debe encontrar toda la información que ofrece el portal web, la cual está compuesta por:
- Instrucciones para la consulta de software: se muestran los pasos a seguir para la búsqueda de una determinada herramienta.
- Asignaturas de acuerdo al semestre: se proporcionan las que utilizan software y están clasificadas por semestre.
- Sistemas operativos: facilita a los usuarios los sistemas operativos para elegir el que sea de su agrado.
- Mensajes informativos: el portal web cuenta con información sobre su funcionalidad, mediante mensajes que motivan al usuario a usar las herramientas que se encuentran alojadas en el mismo.
- Pie de página: el usuario podrá encontrar el copyright, los diferentes enlaces que permiten el acceso a la información de, el aviso legal, las condiciones de uso y los datos de contacto del portal web.
- Módulo de Asignaturas: este módulo cuenta con la mayoría de los elementos que se utilizaron en el módulo de Inicio pero su estructura, diseño y contenido son diferentes.
- Cabecera: en este módulo la cabecera contiene el menú principal del portal web en la esquina superior izquierda, este menú es de tipo *hamburguesa*

ya que su diseño son tres líneas de forma apilada y proporciona sus elementos en forma de lista en todas las pantallas.

- Imagen principal: se encuentra una imagen que hace alusión a la asignatura que se seleccionó y el nombre de la misma.
- Contenido: el contenido está compuesto por dos elementos, los cuales se encuentran en forma de menú vertical, ubicado en la parte izquierda del portal web:
- Objetivo de la asignatura: muestra la meta que se pretende alcanzar al término de la misma.
- Software: se muestran herramientas que se utilizan en una determinada asignatura en forma de lista, estas a su vez contienen información del mismo mediante un menú secundario.

### **Fase de Programación**

Una vez terminado el diseño de la estructura del portal web se determina que lenguajes de programación o herramientas informáticas se utilizaron para su creación y desarrollo, así como las técnicas que se implementaron en el contenido de manera estática o dinámica. Las herramientas que se utilizaron para la creación del sitio, son:

- Dreamweaver: es la aplicación que se tomó como base para la construcción y diseño del portal web. Dentro de esta herramienta se utilizaron los lenguajes que permitirán la creación del portal, los cuales son:
- HTML: este lenguaje, se utilizó con la finalidad de dar estructura y contenido al portal, por medio de etiquetas que al final interpreta el navegador para que el usuario pueda visualizar el portal.
- CSS: se utilizó para organizar el diseño y estética del portal con mínimas líneas de código, entre los elementos que utilizan este lenguaje están los colores, los tipos y tamaños de letra, las imágenes, entre otros.
- JavaScript: este lenguaje se utilizó para dar efectos y animaciones al contenido del portal, además de que permite visualizar el contenido en todos los navegadores.

Las técnicas en diseño que se utilizaron, son las siguientes:

- Diseño responsivo: conocido como RWD por sus siglas en inglés (Responsive Web Design), se utilizó esta técnica para que la visualización del portal web se adapte a cualquier dispositivo, ya sean ordenadores, tablets o móviles.
- Animación: para tener un sitio web agradable se utilizaron diferentes tipos de animaciones, las cuales son:
- Animaciones de carga: al inicio del sitio web, se utilizó una animación de carga o pre loader, el cual servirá para mostrar al usuario el tiempo de espera para visualizar el sitio.
- Animaciones en movimiento: se utilizaron animaciones de movimiento para que las imágenes no fueran de forma estática.
- Scrolling: es una técnica que muestra los elementos del sitio en forma de transiciones, con el propósito de no aburrir a los usuarios.
- Hover: la animación hover se utilizó para crear movimientos al utilizar el ratón sobre el contenido.
- Parallax: en algunas partes del sitio, el usuario encontrará este tipo de animación con solo hacer scroll vertical.
- Tipografías: el contenido del portal web contiene diferentes tipos y tamaños de letra, con el propósito de brindar al usuario un diseño adecuado y sobresaliente.
- Imágenes: en su mayoría, el portal web cuenta con imágenes para que no sea un sitio plano y aburrido para el usuario.

### **Fase de Testeo**

Para comprobar el funcionamiento óptimo del portal web, es necesario realizar algunas pruebas de rigor con el propósito de encontrar posibles fallas o defectos en la aplicación. Entre las pruebas que se realizaron se encuentran:

- Comprobación en navegadores: se verificó la ejecución adecuada del portal web en los navegadores, Google Chrome, Internet Explorer, Safari y Mozilla Firefox.

- Detectar vínculos rotos: durante las pruebas realizadas al portal, se encontraron algunos vínculos que no tenían acceso a las diferentes secciones, por lo cual se tuvo que corregir dicho error.
- Comprobar tiempo de descarga: el tiempo de descarga no es tan rápido ya que contiene imágenes y animaciones en la mayoría del contenido del portal web.

### **Fase de Mercadeo y Publicidad**

El portal web es un desarrollo tecnológico educativo creado como proyecto terminal de la Maestría en Tecnologías de la Información para la Educación de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Está dirigido a los estudiantes que cursan la MTIE, por lo cual se encuentra el software utilizado en la misma, es por ello que su principal medio de difusión es dentro del posgrado.

## **5. Resultados**

Los resultados que se han obtenido hasta el momento son, la creación de un portal web al que se denominó Seeker<sup>17</sup> y un total de 11 materiales. Todas las herramientas serán instaladas en el servidor del Centro de Innovación para el Desarrollo y la Capacitación en Materiales Educativos (CIDECAEME) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, infraestructura en la que se imparte el posgrado. En el periodo escolar agosto-diciembre 2016, se encuentran habilitadas las asignaturas de Multimedia y Objetos de Aprendizaje – Repositorios de Objetos de 1º y 2º semestre, respectivamente, con la finalidad de que sean evaluadas por los estudiantes de la MTIE.

### **Función de los recursos**

Los recursos de apoyo incluidos en el portal web Seeker tienen como objetivo primordial enseñar al usuario la funcionalidad y lo que puede crear con una determinada herramienta, mediante una serie de instrucciones o pasos a seguir para una buena comprensión y de esta manera, lograr el uso correcto de la

---

<sup>17</sup> <http://seekker.businesscatalyst.com/index.html>

misma. A continuación se describe la distribución del contenido del portal web Seeker.

### **Pantalla de Inicio**

En esta sección se puede observar la estructura que integra al portal web, compuesta por información relevante del sitio y los enlaces hacia las tres subsecciones del portal. En la figura 3 se puede observar la pantalla principal del portal web Seeker.

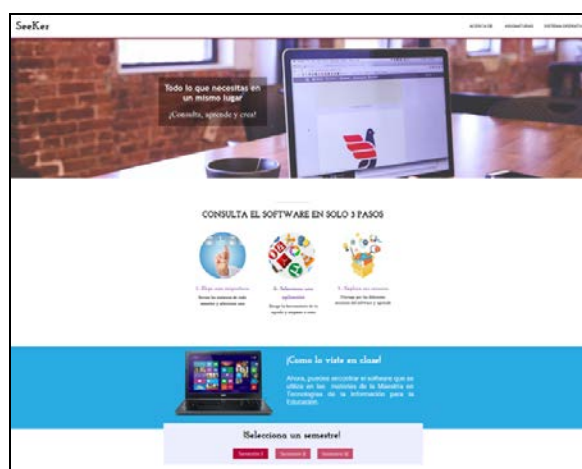


Figura 3 Portal web Seeker.

### **Menú principal**

Este elemento contiene las opciones que el portal web ofrece y las cuales envían al usuario a sus determinadas secciones por medio de enlaces proporcionando información específica de las mismas, tanto la opción Asignaturas como la opción Sistema Operativo se encuentran en la parte inferior de la página principal del portal y se accede a ellas a través del menú o utilizando la barra de desplazamiento.

### **Asignaturas**

Este apartado es el más importante del portal web, ya que muestra las asignaturas de la Maestría en Tecnología de la Información para la Educación que hacen uso de software de aplicación, las cuales están clasificadas por semestre.

Cuenta con un menú que muestra los semestres del posgrado, donde a su vez se encuentran las asignaturas que lo integran, para seleccionar una asignatura en específico se debe elegir el semestre y la materia, como se aprecia en la figura 4. Al seleccionar una materia, se muestra el apartado principal donde se observa el nombre, una imagen alusiva al tema y un menú secundario que proporciona información adicional.



Figura 4 Asignaturas de la MTIE.

Al seleccionar la asignatura Multimedia se encuentra un menú, el cual está compuesto por: objetivo general que muestra al usuario el propósito de la asignatura y Software, que proporciona el software que se utiliza únicamente en esa asignatura, éste a su vez cuenta con un menú interno que contiene información del software y otros componentes, un ejemplo de ello se muestra en la figura 5.



Figura 5 Software photoshop de multimedia.



El menú interno del software proporciona información relativa al mismo y recursos opcionales para su uso, está compuesto por los siguientes elementos:

- **Descripción:** Este elemento contiene las características y funcionalidad del software, proporciona además, imágenes alusivas al mismo.
- **Material de ayuda:** Es un apartado que contiene recursos de apoyo para aprender a utilizar la herramienta, está compuesto por una clasificación que muestra tres tipos de autores, los cuales son, autor del software, autores externos y del portal, éstos se pueden elegir mediante un menú como se puede apreciar en la figura 6.
- **Aplicaciones similares:** En esta sección se encuentran las herramientas similares a las que se ofrecen en la asignatura, cada una de ellas cuentan también con la misma estructura, como se puede apreciar en la figura 7.

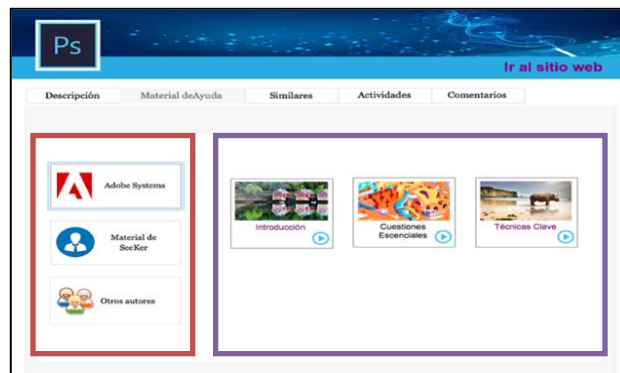


Figura 6 Material de ayuda.

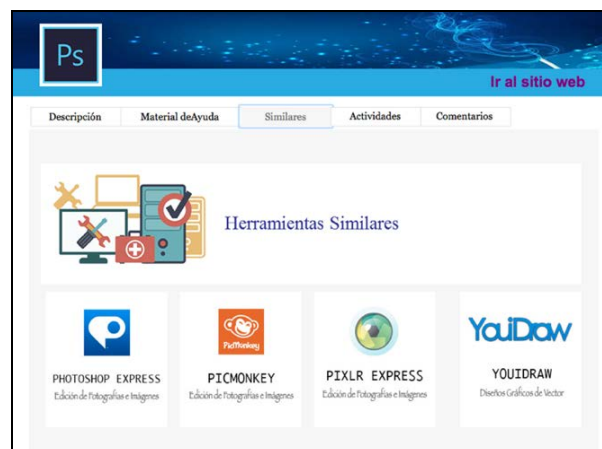


Figura 7 Aplicaciones similares a Photoshop.

- **Actividades:** Este apartado está compuesto por una serie de actividades que ayudarán al usuario a poner en práctica el aprendizaje obtenido.
- **Comentarios:** En esta sección el usuario puede añadir comentarios y sugerencias sobre las herramientas, con la finalidad de tener una retroalimentación de la misma.

## **Sistemas operativos**

Esta sección ofrece los sistemas operativos que tienen mayor demanda entre los usuarios, su acceso se permite pulsando en el ícono del sistema que se requiere visualizar.

## **6. Discusión**

Los perfiles educativos de los estudiantes de la MTIE son diversos, es decir, no todos cuentan con conocimientos en computación o conocimientos básicos para el uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación, es por ello que los materiales del portal web desarrollados en el presente trabajo se crearon, de tal manera que fueran intuitivos y amigables a los usuarios, con la finalidad de que los estudiantes puedan acceder a ellos y aprender de forma sencilla.

Asimismo, las primeras generaciones de la MTIE han asimilado las diversas herramientas vistas durante los cuatro semestres que la comprenden, sin embargo, ahora el portal web les permitirá conocer de manera fácil otras herramientas similares a las vistas en el programa, con la finalidad de que cuenten con diversas opciones para el desarrollo de sus materiales educativos y que éstos cumplan sus expectativas o sus necesidades.

## **7. Conclusiones**

Las conclusiones que se obtuvieron de la investigación realizada para el desarrollo del presente trabajo es la creación de un portal web amigable e intuitivo enfocado al perfil de ingreso de los estudiantes de la Maestría en Tecnologías de la Información para la Educación. De esta manera, con la integración del software que se utiliza en las asignaturas de la MTIE, los estudiantes pueden tener acceso

en cualquier momento a las diversas herramientas desde cualquier dispositivo, incluyendo herramientas similares a éstas. Asimismo, la inclusión de los recursos de ayuda de los diferentes autores motivan a los estudiantes a aprender a utilizarlos sin necesidad de salir del portal web.

Por lo que se puede mencionar como trabajos futuros, el permitir a los usuarios subir al portal web material de apoyo que considere importante para el software. Además de incluir recursos de información que ayuden a los estudiantes a generar sus materiales de manera correcta. Y finalmente, desarrollar el portal web en otros idiomas para usuarios externos.

## **8. Bibliografía y Referencias**

- [1] Banana-Soft.com. <http://banana-soft.com/>. Octubre de 2015.
- [2] BUYTO. ¿Qué es un portal web?: <http://www.buyto.es/general-diseno-web/que-es-un-portal-web>. Mayo 2016.
- [3] Centro de Comunicación y Pedagogía. Los MOOC: orígenes, historia y tipos. <https://www.centrocp.com/los-mooc-origenes-historia-y-tipos/>. Agosto 2016.
- [4] CIDECAME. Centro de Innovación para el Desarrollo y la Capacitación en Materiales Educativos. <http://cidecame.uaeh.edu.mx>. Abril 2016.
- [5] Metodología para la Creación de Sitios Web.<http://disenowebakus.net/metodologia-para-la-creacion-de-sitios-web.php>. Mayo 2016.
- [6] Instituto Mar de Cortés. Metodología para la creación de sitios web. [http://www.instituto-mardecortes.edu.mx/pubs/metodologia\\_web.pdf](http://www.instituto-mardecortes.edu.mx/pubs/metodologia_web.pdf). Enero 2016.
- [7] J. Cabrera Santiago. “Desarrollo de un sitio web informativo para la Maestría en Informática Administrativa de la FCA-UNAM”. 2015. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 123 páginas.
- [8] L. T. Flores Castillo, Diseño y desarrollo del portal para la materia de diseño de sistemas digitales. 2010. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 53 páginas.

- [9] Maestría en Tecnologías de la Información para la Educación, UAEH. [http://www.uaeh.edu.mx/campus/icbi/oferta/maestrias/icbicimaestria\\_en\\_tec\\_de\\_la\\_info\\_para\\_la\\_educacion.html](http://www.uaeh.edu.mx/campus/icbi/oferta/maestrias/icbicimaestria_en_tec_de_la_info_para_la_educacion.html). Enero 2016.
- [10] M. J. Pavón, Conceptos generales para optimizar tu web. Primera Edición. 2012. 89 páginas.
- [11] RedAccenir, S.L. PortalProgramas. <http://www.portalprogramas.com/>. Octubre 2015.
- [12] Snapfiles. <http://www.snapfiles.com/about.html>. Enero 2016.
- [13] Softonic International, SA. <http://corporate.softonic.com/who-we-are/our-story>.
- [14] TodoProgramas. Navegadores de internet más utilizados. <http://www.todoprogramas.com/navegadores/navegadores-de-internet-mas-utilizados>. Enero 2016.
- [15] Tucows. <http://www.tucows.com/about-us/history/>. Enero 2016.
- [16] UNESCO. “Las TIC en la Educación”. <http://www.unesco.org/new/es/unesco/themes/icts/>. Abril 2016.
- [17] Uptodown.com. <http://www.uptodown.com/aboutus/uptodown>. Octubre 2015.
- [18] w3schools.com. [http://www.w3schools.com/html/html\\_intro.asp](http://www.w3schools.com/html/html_intro.asp). Enero 2016.

## 9. Autores

M.C.C. Verónica Martínez Lazcano obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Computación en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, en Pachuca, Hidalgo.

L.S.C. Mariel Montaña Montiel, obtuvo su título de Licenciada en Sistemas Computacionales en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, en Pachuca, Hidalgo.

Dra. María de los Ángeles Alonso Lavernia obtuvo su título de Doctora en Ciencias de la Computación con especialidad en Inteligencia Artificial en el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, en México.

# **ESTUDIO DE ACEPTABILIDAD DEL SITIO WEB REPOTOPICS BAJO EL ESQUEMA DEL MODELO DE ACEPTACIÓN TECNOLÓGICA DE DAVIS**

***Fernando de los Reyes Quiroz***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
*fedelosreyes@itesi.edu.mx*

***David Antonio Torres Frausto***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
*datorres@itesi.edu.mx*

***Rodrigo Villegas Téllez***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
*rovillegas@itesi.edu.mx*

## **Resumen**

En el departamento de educación a distancia de ITESI surge la necesidad de desarrollar un sitio web de video streaming cuyo acceso no sea limitado por la tecnología, por ello el sitio requiere ser desarrollado con HTML5, siendo éste el que permite la visualización desde dispositivos móviles. Bajo el estudio de aceptabilidad tecnológica TAM de Davis se definen 3 percepciones para determinar la aceptabilidad del objeto de estudio, la cual es el objetivo general del proyecto y como escenario hipotético predice la aceptabilidad del sitio por parte de alumnos y profesores de ITESI. El desarrollo del prototipo se basa en el modelo de desarrollo orientado a prototipos; Para la recolección de datos se emplea la muestra definida a través de la técnica “muestreo aleatorio estratificado”, donde la población es de 4538 estudiantes y el tamaño de la muestra es de 7.94% de la población total, dando como resultado 368 personas encuestadas. Posteriormente y mediante la aplicación de encuestas en base a TAM, se obtiene que el prototipo RepoTopics es aceptado por mayoría en los niveles de aceptación “De acuerdo” y

“Totalmente de acuerdo” respecto a la escala de Likert, aseverando así la hipótesis alternativa a través de una prueba estadística.

**Palabra(s) Clave(s):** Davis, prototipo, sitio web y TAM.

## **1. Introducción**

Si se considera el avance tecnológico el cual en las últimas décadas ha crecido exponencialmente, es imposible concebir que una organización funcione con carácter de primer nivel sin hacer uso de las nuevas tecnologías, que faciliten la administración y el manejo de la información, dando paso al mejoramiento de los procesos dentro de dichas instituciones. En el paso del tiempo se han hecho y creado distintos modelos que designan y ayudan a definir el nivel de aceptación de las nuevas tecnologías emergentes o ya existentes, por mencionar algunos de los trabajos más relevantes que han hecho uso de ellos, tenemos a (Mehta, 2013), (Ng, Shroff, & Cher, 2013), (Sun, Wang, Xitong, & Zeyu, 2013), (Tavera & Arias, 2012), en dichos trabajos se ha empleado el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) (Davis, Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology, 1989). En el cual se hace mención sobre los distintos factores que influyen o que facilitan a los administradores o al usuario a decidir de qué forma y cuál sería el momento idóneo para emplear la tecnología en cuestión. En la actualidad dentro del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI), se desarrollan e implementan diferentes tecnologías de información y comunicación, esto con la finalidad de solventar los distintos procesos de la institución, sin embargo la consideración del usuario final es nula, como resultado de esta mala práctica, es complicado saber si las herramientas serán aceptada o declinadas por parte de los mismos, ya que no hay investigaciones preliminares que otorguen con fundamento la aceptabilidad o el rechazo por parte del usuario. Actualmente, en ITESI se ofrece la modalidad de educación a distancia y se implementan herramientas web que apoyan a algunos de los procesos de la institución, como lo es el sistema búho (sistema institucional para alumnos y maestros), plataforma SAE, la página oficial institucional, entre otras que no están implantadas, sin embargo, debido a que no se toma en cuenta al usuario final, la

imposición de ser utilizadas ha impactado negativamente, esto se debe a que no se realiza un previo estudio que permita conocer si serán aceptadas o rechazadas por parte del usuario.

Este proyecto se enfoca en realizar un estudio de esta índole, utilizando como herramienta de medición de aceptabilidad el Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM), el cual indica que influyen diferentes factores que ayudan al usuario a decidir cuándo y cómo utilizar la tecnología en cuestión. (Davis, Bagozzi, & Warshaw, User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models, 1989) El objeto de estudio es una herramienta web denominada RepoTopics que da solución a una necesidad identificada en el departamento de educación a distancia de ITESI. Al realizar esta investigación se pretende conocer la percepción del usuario previo a su completo desarrollo y por consecuente, evitar el impacto negativo de uso que se ha presentado en las herramientas actuales, generando así, un fundamento verídico que sustente su posterior desarrollo o de lo contrario, no se llegue hasta esa etapa.

## **2. Desarrollo**

### **Objetivo**

Determinar la aceptabilidad del prototipo de un sitio web de video streaming, para una plataforma web dedicada a la transmisión bajo demanda de contenido multimedia (videos) empleando como punto de partida el material digital creado para la asignatura cálculo diferencial en ITESI, en un periodo comprendido febrero-noviembre 2015.

### **Problemática**

El Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI) cuenta con diversas modalidades de estudio como lo son semestrales, cuatrimestrales y virtuales, para la formación de profesionistas en distintas carreras impartidas en el instituto. ITESI atiende la modalidad virtual en el área de Educación a Distancia, donde, los alumnos inscritos, pueden completar su carrera profesional de manera no presencial mediante la interacción con los profesores empleando un Entorno

Virtual de Enseñanza y Aprendizaje (EVEA) como herramienta de comunicación para la enseñanza de temas acordes a la carrera y actividades concernientes a la misma.

En el año de 2009 se desarrolló un sitio web de video streaming para el área anteriormente mencionada, el cual contenía material multimedia (videos) de apoyo para la asignatura de cálculo diferencial. Al realizar la investigación de campo en el departamento de educación a distancia, se entrevistó al MTI. Juan Antonio Magdaleno Zavala docente y encargado de la plataforma del área, para obtener información acerca del sitio anteriormente desarrollado y éste al dialogar sobre lo ocurrido con ese proyecto predice lo siguiente: *“Estoy casi seguro que el proyecto anterior no pudo ser utilizado en su totalidad ya que los alumnos e incluso los profesores desconocían completamente la existencia del sitio”*, además se entrevistó al Licenciado en Informática José Luis Ramírez quien mencionó lo siguiente durante la entrevista: *“El sitio estaba en operación, pero al transcurrir el tiempo notamos que el sitio no estaba siendo utilizado y debido a razones operativas se tuvo que dar de baja”*. Desde entonces no existe una manera en la que se presente el contenido para la asignatura, el cual fue elaborado por profesores de la institución, ya que la tecnología que fue empleada en el momento del desarrollo del sitio es ahora obsoleta en comparación con la tecnología actual; por lo tanto los encargados del departamento hacen notar la necesidad de un sitio de tal naturaleza en la cual su principal objetivo es la introducción del mismo a nuevas tecnologías, en este sentido la accesibilidad desde los dispositivos móviles y evitar así un retraso tecnológico.

Otro de los conflictos persistentes son las búsquedas exhaustivas que los profesores y alumnos realizan en el repositorio de video de YouTube principalmente, con la finalidad de obtener información acorde a los temas impartidos y cursados, llegan a ser infructuosas debido a la alta dispersión de información, videos con licenciamiento de no reutilización y cuyo contenido es poco fidedigno; por lo cual se requiere una inversión de tiempo mucho mayor en clase y extra-laboral para realizar la búsqueda y así obtener información útil.



## Hipótesis

- H0. El prototipo de un sitio web de repositorio de video streaming RepoTopics NO será aceptado por los alumnos presenciales y los profesores del área de ciencias básicas de la institución.
- H1. El prototipo de un sitio web de repositorio de video streaming RepoTopics será aceptado por los alumnos presenciales y los profesores del área de ciencias básicas de la institución.

## Modelo de Aceptación Tecnológica (TAM) de Davis

El Modelo de Aceptación de la Tecnología (TAM) es una teoría de los sistemas de información que modela cómo los usuarios llegan a aceptar y utilizar una tecnología. El modelo sugiere que cuando a los usuarios se les presenta una nueva tecnología, una serie de factores influyen en su decisión sobre cómo y cuándo la van a utilizar, en particular:

- *PU (Perceived usefulness, Utilidad Percibida)*. Ésta fue definida por Fred Davis como "el grado en que una persona cree que el uso de un determinado sistema mejora su rendimiento en el trabajo".
- *FUP (Perceived ease-of-use, Percepción de facilidad de uso)*. Davis lo define como "el grado en que una persona cree que utilizando un sistema en particular, podrá liberarse del esfuerzo que le conlleva realizar un trabajo". (Davis, Bagozzi, & Warshaw, User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models, 1989).

TAM es una adaptación de la TRA (Theory of Reasoned Action, Teoría de la Acción Razonada) para el ámbito de la Ingeniería de Software. TAM afirma que se percibe la utilidad y la facilidad de uso que determinan el propósito de una persona (usuario), al utilizar un sistema antes de enfrentarlo al empleo del sistema real.

Los investigadores han simplificado el TAM mediante la eliminación de la actitud de construcción que se encuentran en la especificación actual de la TRA. Los intentos de ampliar el TAM por lo general han seguido uno de los siguientes tres enfoques:

- Mediante la introducción de factores de modelos relacionados;
- Mediante la introducción de factores adicionales o alternativos,
- Por referencias, de antecedentes y asesorías de utilidad percibida, y de percepción de facilidad de uso.

TRA y TAM tienen fuertes elementos que miden el comportamiento. Se supone que cuando alguien tiene el propósito de actuar, será libre de actuar sin limitaciones. En la práctica eso no sucede, ya que limitaciones de capacidad en las personas, el tiempo, limitaciones ambientales o de organización y hábitos inconscientes, pueden limitar la libertad de actuar.

El TAM de Davis F. (figura 1) predice la aceptación tecnológica basada en dos variables: utilidad y facilidad de uso percibida, las cuales sirven de base para determinar las actitudes enfocadas al uso del sistema. Ambas variables tienen un impacto directo en el comportamiento o en la actitud de uso de nuevas tecnologías por parte de los usuarios.

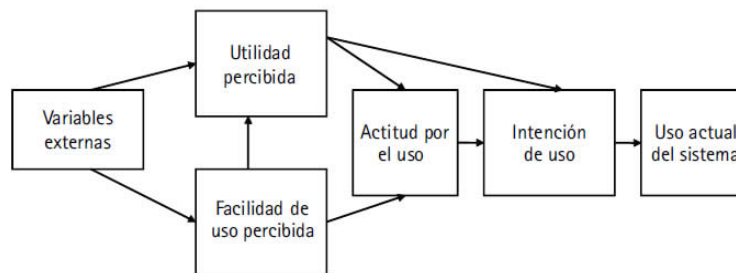


Figura 1 Modelo de aceptación tecnológica de Davis (TAM).

## Metodología

Para determinar el tipo de investigación de éste proyecto son consideradas las características más importantes de los enfoques cuantitativo y cualitativo definidos por (Sampieri, Fernández, & Baptista, 2010). El enfoque cuantitativo requiere que el proceso se elabore de una manera sistemática, ordenada y estricta para poder realizar una investigación; es inflexible por lo tanto no se puede tener un control más adecuado en cuanto a estudio de variables, dígame muestra. Por otra parte, el enfoque cualitativo es más flexible, permite poder realizar la investigación en un

entorno donde la muestra pueda ser controlada y sustraer el conocimiento necesario mediante una investigación.

Empleando un enfoque mixto en el desarrollo de la investigación y aunado a la característica del enfoque cualitativo sobre el control de muestra, la antes mencionada es basada en un tipo de estudio cuasi-experimental, también determinado por su naturaleza de control. En la figura 2 se muestra el esquema metodológico que se seguirá para la realización del proyecto:

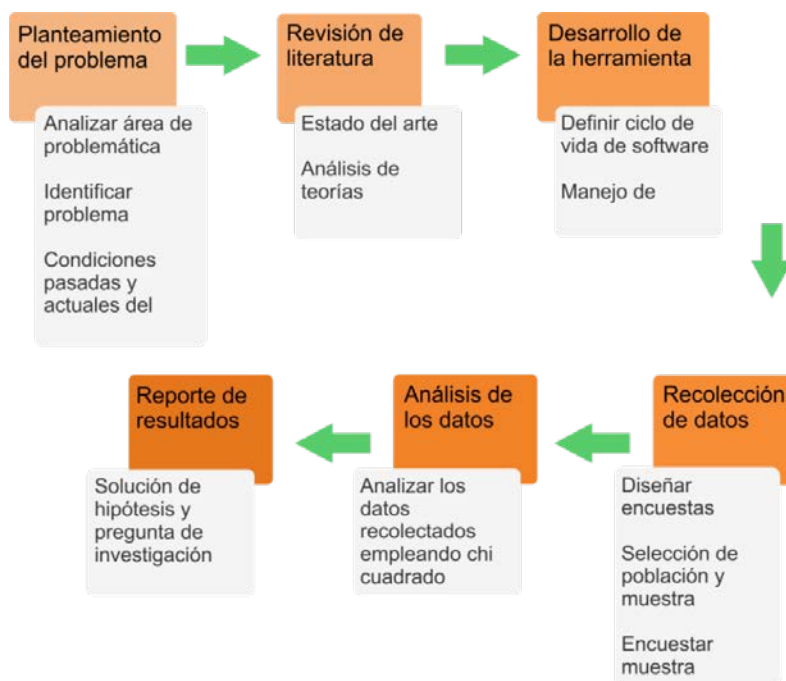


Figura 2 Esquema metodológico del proyecto.

El planteamiento del problema se encuentra como la etapa inicial, dentro están definidas 3 actividades con las cuales se dará comienzo:

- *Analizar área de problemática.* Concertar charlas con responsable(s) del área de educación a distancia, el MTI. Juan Antonio Magdaleno Zavala y el Lic. en formativa José Luis Ramírez, para escuchar las necesidades potenciales que deben ser atendidas.
- *Identificar problema.* La necesidad que impera en el área de educación a distancia es la imposibilidad de un sitio web de video streaming capaz de ser visualizado en un dispositivo móvil.

- *Condiciones pasadas y actuales del problema.* Hubo un desarrollo previo de un sitio de ésta naturaleza, sin embargo ahora es requerido uno nuevo que pueda ser visto desde un dispositivo móvil.
- La siguiente etapa definida como revisión de literatura es la introducción al ámbito del proyecto, comienza con:
- *Estado del arte.* Se redacta el estado en el que se encuentran los sitios web de video streaming en el ramo de educación.
- *Análisis de las teorías.* Analizar las teorías concernientes al proyecto tales como cliente-servidor, protocolos de comunicación, servicios web y sistemas operativos de red, por mencionar algunas.
- La siguiente etapa es el desarrollo de la herramienta, dígame el sitio, basándose en dos actividades:
- *Selección de un ciclo de vida de software.* A pesar de que la herramienta está definida como un prototipo es necesario ahondar en los detalles del ciclo de vida de prototipo para poder lograr una aplicación exacta del ciclo de vida.
- *Manejo de HTML5.* Una vez definido el ciclo de vida y llegado a la etapa de codificación correspondiente se procederá a realizar el sitio web mediante el lenguaje de marcado HTML5.
- La recolección de los datos se rige por 3 actividades para su cumplimiento:
- *Diseñar encuestas.* Adaptar el cuestionario del modelo de aceptación tecnológica (TAM) seleccionando aquellas preguntas aplicables a éste proyecto y elaborar las encuestas para poder presentarlas a los usuarios durante las pruebas locales.
- *Selección de la población y muestra.* Analizar los factores más importantes por los cuales se está seleccionando una población y muestra para poder aplicar las encuestas de aceptación tecnológica y poder obtener los resultados necesarios para definir dicha aceptación.
- *Encuestar la muestra.* Una vez elegida la muestra bajo ciertos criterios se procederá a aplicar las encuestas a los usuarios destino para poder obtener los resultados.

## **Ejecución de análisis y especificación del prototipo**

En todo proyecto de desarrollo de software, la fase del análisis del ciclo de vida seleccionado se enfoca en determinar partes críticas e importantes para el desarrollo de éste. A continuación, se determinan los requerimientos del sitio web RepoTopics y se describe el estudio de factibilidad realizado.

## **Factibilidad Operativa**

El objetivo de la factibilidad operativa es determinar si el ITESI cuenta con personal capacitado para hacer uso del sitio web RepoTopics y pueda administrarlo, así como determinar si el usuario final; es decir, los alumnos de dicha institución, cuentan con conocimientos para hacer uso de él.

Para determinar esto, se aplicó la “Encuesta de factibilidad técnica y operativa del sitio web RepoTopics”, al 7.94 % de la población total de estudiantes de ITESI Plantel Irapuato, que equivale a 360 estudiantes de 4538 estudiantes totales y los profesores del área de ciencias básicas, dando como resultado 365 encuestados. (Mares, 2015)

La muestra seleccionada se definió por muestreo aleatorio estratificado, la cual está conformada por alumnos de todas las especialidades de ingeniería y licenciatura de ITESI de los semestres correspondientes al periodo agosto – diciembre 2015, siendo estos primero, tercero, quinto, séptimo y noveno. La razón de que se realizara de esta manera, es debido a que no todas las carreras tienen el mismo número de alumnos, por tanto, esto podría causar una variación desproporcional en la selección, si ésta hubiese sido realizada de manera proporcional. Además, se considera que los alumnos de cada especialidad tienen un perfil en común y al hacer la selección de la muestra por estratos los alumnos seleccionados representan a cada una de las especialidades de manera general.

En base al reporte de población escolar del periodo agosto – diciembre 2015, proporcionado por el coordinador de la especialidad de Ingeniería en Informática, el Ingeniero Francisco Nicolás Mares Armenta, se obtuvo la tabla 1 Total de alumnos semestre–carrera, a partir de la cual se determinó la muestra.

Para seleccionar la cantidad de alumnos convenientemente, se dividió 360 entre el número total de especialidades que es 12, donde el resultado es 30, lo que quiere decir que por carrera se tomarían 30 alumnos. De estos 30 alumnos por carrera se dividió entre 5, correspondiente al número de semestres considerados para la aplicación de la encuesta, siendo el resultado 6. Este resultado indica el número de alumnos encuestados por semestre.

A excepción de la especialidad de Ing. Sistemas Automotrices, la selección del número de alumnos por semestre varía, debido a que a partir del séptimo semestre no hay alumnos en curso. La selección que se hace es de 10 alumnos por cada uno, obteniendo como resultado 30, correspondiente a que solo se consideran el primer, tercer y quinto semestre.

Tabla 1 Total de alumnos semestre – carrera.

Especialidad	1º	3º	5º	7º	9º
Ing. Industrial	389	212	70	93	75
Ing. Informática	36	11	26	22	27
Ing. Sist. Comp.	104	63	54	44	37
Ing. Electromecánica	118	88	53	51	40
Ing. Electrónica	24	23	44	16	38
Ing. Bioquímica	108	90	91	44	52
Ing. Materiales	21	11	29	35	32
Ing. Mecatrónica	183	140	58	72	62
Lic. Biología	36	27	31	25	22
Ing. Gest. Emp	195	89	70	72	63
Ing. Logística	96	41	60	49	65
Ing. Sist. Autom	164	99	67		

En la tabla 2 se muestra la distribución de la muestra de 360 alumnos entre las 12 especialidades y los 5 semestres considerados.

En base a la encuesta de factibilidad técnica y operativa se obtiene como resultado que el proyecto es factible técnicamente en base a la mayoría de puntaje en las preguntas 1 y 2, 232 y 296 respectivamente, de la encuesta referentes a la cuestión técnica por parte de los usuarios, además, también es factible operativamente ya que de igual manera existe una mayoría de puntajes, 232

puntos, en la pregunta 4 referente a los conocimientos sobre navegación de sitios web de video.

Tabla 2. Distribución de la muestra seleccionada.

Especialidad	1º	3º	5º	7º	9º	Total
Ing. Industrial	6	6	6	6	6	30
Ing. Informática	6	6	6	6	6	30
Ing. Sist. Comp.	6	6	6	6	6	30
Ing. Electromecánica	6	6	6	6	6	30
Ing. Electrónica	6	6	6	6	6	30
Ing. Bioquímica	6	6	6	6	6	30
Ing. Materiales	6	6	6	6	6	30
Ing. Mecatrónica	6	6	6	6	6	30
Lic. Biología	6	6	6	6	6	30
Ing. Gest. Emp	6	6	6	6	6	30
Ing. Logística	6	6	6	6	6	30
Ing. Sist. Autom	10	10	10			30
<b>Total alumnos</b>						<b>360</b>

### Especificación del diseño y construcción del prototipo

El diseño del sitio web se definió a partir de las especificaciones que el encargado del departamento M.T.I. Juan Antonio Magdaleno Zavala solicitó, ya que al tratarse de un sitio web educativo institucional debe seguir un esquema estandarizado que respete la estructura y características de la institución tales como colores, logo y un esquema general.

Para comenzar se usó como referencia unos bosquejos creados en conjunto con el encargado del departamento con la finalidad de que estos permitieran visualizar la estructura del sitio. En trabajo conjunto con el encargado del departamento se trabajó en un par de bosquejos del sitio web de administración. Una vez realizados los bosquejos, estos se mostraron al M.T.I. Juan Antonio Magdaleno Zavala para que fueran revisados y aprobados; y así poder comenzar con la construcción del prototipo.

El primer diseño se enfocó en la reproducción de los videos desde un dispositivo móvil, como se muestra en la figura 4 Primer prueba de reproducción; dejando en segundo plano el diseño como se definió en los bosquejos.

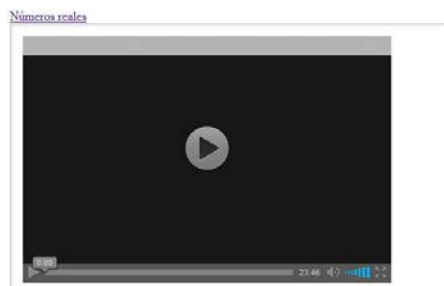


Figura 4 Primera prueba de reproducción.

Una vez que la reproducción del video desde el dispositivo móvil fue exitosa, se enfocó en la reproducción desde un link para generar un switcheo de reproducción entre un video y otro, como se muestra en la figura 5 Segunda prueba de reproducción de video.



Figura 5 Segunda prueba de reproducción de video.

### 3. Resultados

Para establecer los resultados se toma como referencia una prueba de hipótesis se basa en 5 pasos:

*1. Definición de hipótesis.* Las hipótesis definidas para este proyecto y que además sirven para realizar la prueba se muestran a continuación:

H0. El prototipo de un sitio web de repositorio de video streaming RepoTopics NO será aceptado por los alumnos presenciales y los profesores del área de ciencias básicas de la institución.



H1. El prototipo de un sitio web de repositorio de video streaming RepoTopics será aceptado por los alumnos presenciales y los profesores del área de ciencias básicas de la institución.

II. *Determinación de significancia.* El valor de la significancia considerado como margen de error para este estudio es de 0.05 ( $\alpha = 0.05$ ), teniendo un nivel de confianza de 95%.

III. *Cálculo del valor estadístico.* Como se mencionó anteriormente, la prueba estadística no paramétrica que se utiliza para el cálculo del valor estadístico es chi cuadrada ( $X^2$ ). Este cálculo se puede hacer a mano cómo se explicó anteriormente o también se puede realizar en la herramienta de Software Minitab. Con el fin de comprobar el resultado obtenido  $X^2$  se utilizó esta última opción, obteniendo que  $X^2 = 100,834$  y  $gl = 56$ .

En base al grado de libertad calculado,  $gl = 56$  y el valor de significancia determinado,  $\alpha = 0.05$  obtenemos la gráfica de distribución, como se observa en la figura 6 Distribución de  $X^2$ . Esta indica que el valor crítico de  $X^2_c$  es igual a 74,5, es decir, para que  $X^2$  sea significativa, su valor calculado debe ser igual o superior a este.

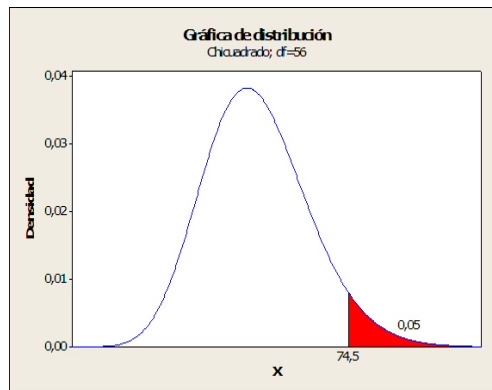


Figura 6 Distribución de  $X^2$ .

IV. *Regla de decisión.* El valor crítico para  $X^2$  con  $\alpha = 0.05$  y 54  $gl$ , da un valor de  $X^2_c = 74,5$ . Por consiguiente, se ha planteado la siguiente regla de decisión:

**Rechazar la hipótesis nula ( $H_0$ ) si el valor calculado de  $X^2$  es igual o superior a  $X^2_c$ .**

V. *Toma de decisión.* Comparando el estadístico de prueba calculado  $X^2 = 100,834$  con el valor crítico de  $X^2_c = 74,5$ , se observa que el estadístico de prueba calculado es mayor al valor crítico, lo que significa que se ubica dentro de la región comprendida para rechazar la hipótesis nula. Determinando así, que se acepta la hipótesis alternativa, la cual establece que el prototipo de un sitio web de repositorio de video streaming RepoTopics será aceptado por los alumnos presenciales y los profesores del área de ciencias básicas de la institución.

### Reporte de resultados

En el análisis de los datos previamente realizado, en base a la prueba de la hipótesis, se ha determinado y comprobado que la hipótesis nula ha sido rechazada y la hipótesis alternativa ha sido aceptada.

Esta determinación se puede comparar con los datos obtenidos de la encuesta en base a TAM, Estos datos son representados de manera gráfica como se muestra a continuación, por cada una de las categorías.

En la figura 7 correspondiente a la frecuencia observada de la categoría de utilidad percibida (UP) se puede observar que los niveles de evaluación con mayor frecuencia son “De acuerdo” y “Totalmente de acuerdo”, de manera que si estos son sumados el porcentaje de la muestra que eligió estos niveles oscila entre el 83% y 87%.

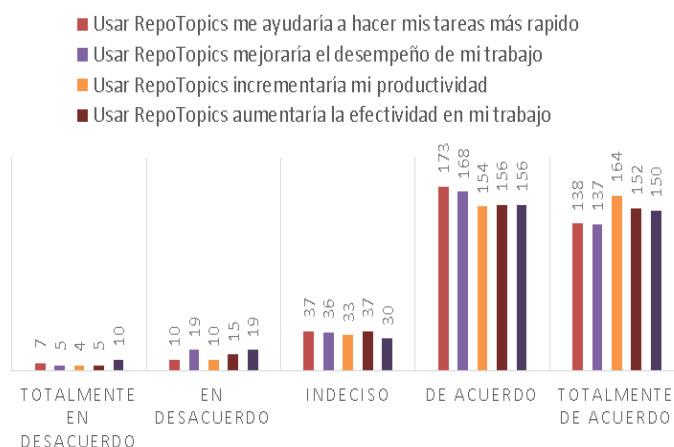


Figura 7 Utilidad percibida.

De igual manera, en la figura 8 correspondiente a la frecuencia observada de la categoría de facilidad de uso percibida (FUP) se puede observar que los niveles de evaluación con mayor frecuencia son “De acuerdo” y “Totalmente de acuerdo”, de manera que si estos son sumados el porcentaje de la muestra que eligió estos niveles oscila entre el 83% y 86%.

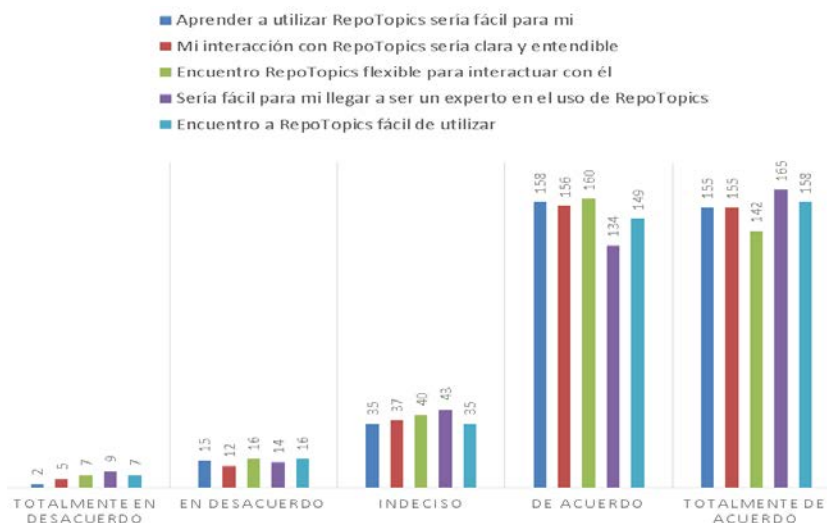


Figura 8 Facilidad de uso percibida.

En la figura 9, correspondiente a la frecuencia observada de la categoría actitud hacia el uso (AHU), se puede observar que los niveles de evaluación con mayor frecuencia son “Totalmente de acuerdo” y “De acuerdo”, de manera que si estos son sumados el porcentaje de la muestra que eligió estos niveles oscila entre el 80% y 86%.

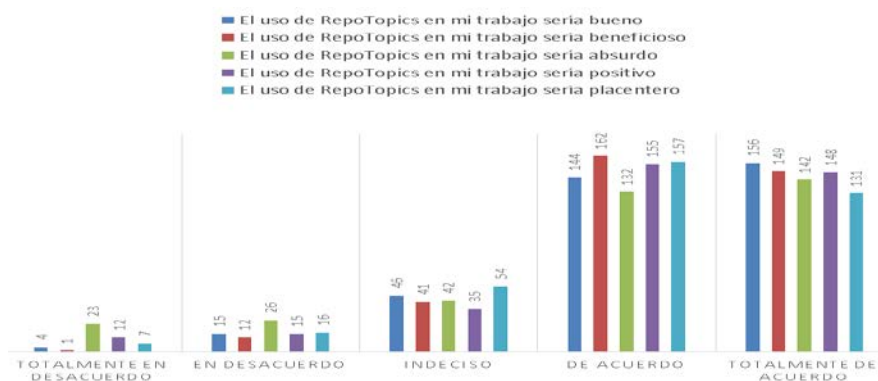


Figura 9 Actitud hacia el uso.

## 5. Conclusiones

La información es de vital importancia para poder tomar decisiones de manera correcta o con el menor error posible, la realización de análisis o estudios previos ayudan en gran medida el tomar la decisión de llevar al desarrollo e implementación algún programa o aplicación. Los resultados obtenidos de la encuesta de aceptación tecnológica realizada representan gráficamente que los usuarios encuestados han aceptado el proyecto, esto constituido por la mayoría de usuarios (78% al 86%) y que para fines del proyecto, la hipótesis que determina la aceptabilidad del prototipo del sitio web RepoTopics ha sido aseverada mediante una prueba estadística y por lo tanto el estudio ha sido completado de manera satisfactoria, concluyendo así que éste proyecto sirve de apoyo para tomar la decisión de llevar al prototipo al siguiente nivel de desarrollo e incrementalmente seguir trabajando en ello hasta un nivel institucional, aunado a la certeza que se tiene del uso por parte del alumnado cuando ya se encuentre operativo el sitio web de video streaming.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] F. Davis, R. Bagozzi, R. Warshaw, "User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models". *Management Science*. 1989. Pp. 982-1003.
- [2] Maestros del Web. <http://www.maestrosdelweb.com/aspintro/>. Mayo 2015.
- [3] DMN Moxilla Developer Network. HTML5. <https://developer.mozilla.org/es/docs/HTML/HTML5>. Mayo 2015.
- [4] M. D. Dorado, *Introducción a las aplicaciones web con ASP e IIS, Todo Programación*. 2004. Madrid: Iberprensa. Pp. 24-26.
- [5] J. Eguíluz Pérez, *¿Qué es CSS?, Introducción a CSS*. 2008. Pp. 241.
- [6] J. D. Guachat, *El gran libro de HTML5, CSS3 y Javascript*. 2012. Barcelona: Marcobo.
- [7] E. Hernández, L. Martínez, *Cliente/servidor*. 1997. Rho-Sigma S.A. San José Costa Rica.

- [8] S. Ian, Procesos del software. En Ingeniería del Software. 2005. Pearson. Madrid, España. pág. 687.
- [9] S. M. Luján, (). Programación de aplicaciones web: historia, principios básicos y clientes web. 2002. Club Universitario. España.
- [10] N. Mares, ¿Cuál es la población total de ITESI? C. Días, & A. López.
- [11] Investigación sobre entornos virtuales de aprendizaje utilizados para la enseñanza en profesorados y unidades nacionales. [www.unioe.edu.ar](http://www.unioe.edu.ar). marzo 2015.
- [12] D. McCracken, M. A. Jackson, "Life cycle concept considered harmful". ACM Software engineering notes. 1982. Pp. 29-32.
- [13] Sistemas gestores de base de datos. <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448148797.pdf>. Mayo 2015.
- [14] Protocolo TCP/IP. <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448199766.pdf>. Mayo 2015.
- [15] Microsoft Developer Network. <https://msdn.microsoft.com/es-es/library/4w3ex9c2%28v=vs.100%29.aspx>. Mayo 2015
- [16] Microsoft. Windows Server 2008 R2.
- [17] R. Pressman, Ingeniería de Software. 2002. Mc GrawHill. España.
- [18] R. C. Redondo, Ayudas de la Universidad de Salamanca para la innovación docente. Curso 2012-2013. 2013.
- [19] H. Sampieri, C. Fernández, P. Baptista, Metodología de la investigación. 2010. Mc Graw Hill. México.
- [20] F. Sánchez, Psicología social. 1998. McGraw Hill. Madrid.
- [21] E. Seoane, Navegadores Web en, La nueva era del comercio: el comercio electrónico. 2005. Ideas propias. España. Pág. 253.
- [22] Glosario V. [http://glosariov.blogspot.mx/2015\\_04\\_01\\_archive.html](http://glosariov.blogspot.mx/2015_04_01_archive.html). Abril 2015.
- [23] Servicio Nacional de Aprendizaje. <https://redesjdeivis.files.wordpress.com/2011/10/servidor-web-windows-server2.pdf>. Mayo 2015.
- [24] A. Tanenbaum, Redes de computadoras. 1997. Prentice Hall.
- [25] D. Villegas Macías, Video Tec. Irapuato. 2014. Guanajuato.

- [26] V. Mehta, "Model For Technology Acceptance: A Study Of Student's Attitude Towards Usage Of Wi-Fi Technology". *International Journal Of Innovative Research & Development*. Vol. II. Issue 1. Pp. 122-130.
- [27] E. Ng, R. Shroff, P.L. Cher, (2013). "Applying a Modified Technology Acceptance Model to Qualitatively Analyse the Factors Affecting E-Portfolio Implementation for Student Teachers' in Field Experience Placements". *Issues in Informing Science and Information Technology*, X, Pp. 355-357.
- [28] Y. Sun, N. Wang, G. Xitong, P. Zeyu, "Understanding the Acceptance of Mobile Health Services: A Comparison and Integration of Alternative Models". *Journal of Electronic Commerce Research*, XIV. Vol. 2. 2013. Pp. 183-188.
- [29] F. Davis, Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. 1989. *MIS Quarterly*, 319-340.
- [30] F. Tavera, E. Arias, "Internet Móvil: Aceptación Tecnológica para el Cierre de la Brecha Digital en Colombia". *Revista Perfil de Coyuntura Económica*. Vol. XIX. Pp. 1-6.
- [31] W. Wiersma, Jurs, *Research Methods in Education*. 2005. Pearson. Boston.

## **7. Autores**

M.T.I. Fernando de los Reyes Quiroz, M.T.I. David Antonio Torres Frausto y M.T.I. Rodrigo Villegas Téllez obtuvieron su título de Maestría en Tecnologías de la Información por la Universidad de Colima.

# RECURSO DIDÁCTICO PARA APRENDER CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN REDES SOCIALES

***Luis Alejandro Flores Oropeza***

Universidad Autónoma de Aguascalientes

*alejandro.floreso@edu.uaa.mx*

***Alejandro Román Loera***

Universidad Autónoma de Aguascalientes

*aroman@correo.uaa.mx*

***Edgar López Delgadillo***

Universidad Autónoma de Aguascalientes

*elopezd@correo.uaa.mx*

## Resumen

En este documento se propone un recurso didáctico que puede ser empleado como apoyo para enseñar circuitos eléctricos de corriente directa a través de una red social. El objetivo de éste artículo, consiste en compartir a los profesores que no tienen experiencia en el ámbito de las redes sociales, una alternativa sencilla y algunas sugerencias para desarrollar materiales de apoyo en sus clases. Se muestra cómo utilizando una red social se pueden ordenar recursos para que cualquier usuario, con acceso a internet, pueda consultar estos materiales y de esta forma aprender a resolver circuitos eléctricos. Un resumen que muestra cómo elaborar este tipo de recursos, así como la manera de implementarlos en una red social se presenta a lo largo de este documento. De la misma manera se muestran algunos de los programas de licencia libre que pueden ser utilizados para lograr este objetivo.

**Palabra(s) Clave(s):** Captura de video, circuito eléctrico, recurso didáctico, red social.

## 1. Introducción

Una red social, como su nombre lo indica, es un espacio en internet en el que convergen grupos de personas con los mismos intereses e inquietudes personales así como académicos o científicos. Por definición una red social no es de carácter educativo, sin embargo, tiene el potencial de ser utilizada como un medio a través del cual los maestros y los alumnos puedan interactuar de tal manera que ésta interacción pueda ser de utilidad para lograr un aprendizaje significativo. Las plataformas de e-Learning que son utilizadas con fines educativos tales como Moodle, BlackBoard entre otras, en la mayoría de los casos, carecen de interés para ser utilizadas por parte de los estudiantes. Lo anterior se debe a que estos últimos viven inmersos en un mundo en el que las redes sociales son de mayor interés para ellos ya que pueden interactuar de una manera más sencilla, rápida y hasta cierto punto lúdicas. En estas redes pueden revisar información en un formato más atractivo, compartir información entre sus miembros y expresar su opinión, todo de una manera dinámica y prácticamente inmediata. Del mismo modo, en las redes sociales, las aplicaciones digitales (imagen y video) pueden ser utilizadas por parte de los estudiantes sin ningún problema tanto en su computadora como en cualquier dispositivo móvil y con ello conseguir un aprendizaje autónomo [1].

El reto al que se enfrentan hoy en día los profesores, es diseñar y construir espacios en las redes sociales que sean de interés para los alumnos. Dice Marc Prensky en su publicación *Nativos e Inmigrantes Digitales* [2], *-Si me preguntan qué es más consistente, si “la nueva materia que se aprende” o “las nuevas maneras con que se aprenden las viejas materias”, sospecho que me quedaría con la segunda opción.-*

Lo anterior deja ver que han aparecido múltiples y nuevas formas en las cuales los alumnos pueden aprender y hacer del conocimiento un aprendizaje significativo para sí mismos. Algunos autores como López C. y Basilotta V. [3] definen al nuevo maestro como un coordinador de la información que se considere importante para ser aprovechada dentro de las redes sociales y al mismo tiempo tratan de definir al maestro como una persona con imaginación



que sea capaz de diseñar experiencias de aprendizaje útiles y llamativas para los estudiantes de las nuevas generaciones, llamados generación digital [1].

## 2. Desarrollo

### Recurso didáctico propuesto

El recurso didáctico que se propone es una combinación de imágenes con animación que se capturan directamente de la pantalla de una computadora y se complementan con audio grabado al mismo tiempo que se desarrolla la presentación. En algunos casos a este recurso se le puede tratar como si fuese un vídeo porque cuenta con las características de estos al quedar toda la información, imágenes, animaciones y audio contenidos en un solo archivo que se puede reproducir con cualquier software multimedia. La propuesta que se hace para manipular las imágenes con animación es a través de presentaciones Power Point, ya que es una herramienta informática bien conocida y que viene incluida en cualquier versión de Office para Windows. La intención de utilizar esta herramienta informática, es para que a la vista de quienes utilicen el recurso didáctico, no tengan dudas y quede lo más claro posible la explicación del tema que ahí se trate de desarrollar. El audio que se adiciona a la presentación se captura al mismo tiempo que se va mostrando la presentación en la pantalla de la computadora. Se utiliza un software de licencia libre con el que se genera un archivo capaz de ser reproducido en cualquier dispositivo móvil. Este proceso se muestra en un diagrama de bloques en donde se observa el esquema general de cómo construir el recurso didáctico que se propone (figura 1) para al final ser compartido en una red social.

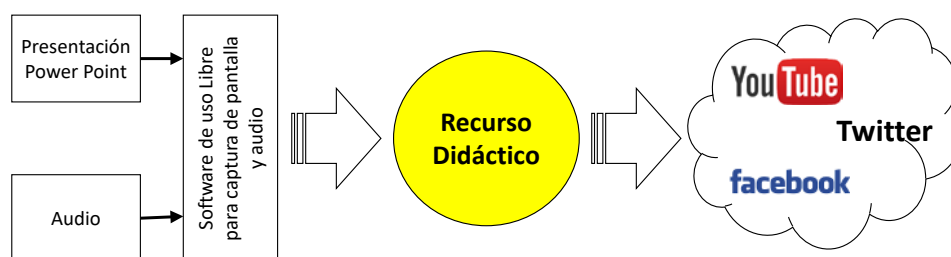


Figura 1 Proceso para elaboración de recurso didáctico para una red social.

En cuanto al contenido de la información en la presentación de Power Point, la forma general de hacerlo es incluyendo una breve descripción del tema a desarrollar y el mínimo de teoría necesaria para su comprensión. Después de esta parte introductoria de teoría, se presenta la explicación a través de imágenes dinámicas de los conceptos o puntos clave para comprender el tema que se esté desarrollando (aprovechando las ventajas de las “animaciones y transiciones” de Power Point). Posteriormente se explica la solución de un ejercicio paso a paso y con el nivel de detalle, complejidad y profundidad suficiente para que quien lo reproduzca pueda aplicar el mismo método en ejercicios distintos. En la parte final de este recurso, y después del desarrollo, se hacen los cálculos necesarios mostrando los pasos a seguir para encontrar la o las soluciones de corrientes, voltajes y potencias según se pida en cada ejercicio. En la figura 2 se muestra el diagrama a bloques del contenido que se debe encontrar en cada uno de los recursos didácticos desarrollados en este trabajo. Es aquí donde cada profesor puede ampliar o definir cómo desarrollar cada una de las partes para la elaboración del recurso didáctico. Mucho dependerá de la experiencia que tenga cada profesor para considerar qué partes son las más importantes y cómo explicar cada una de ellas.

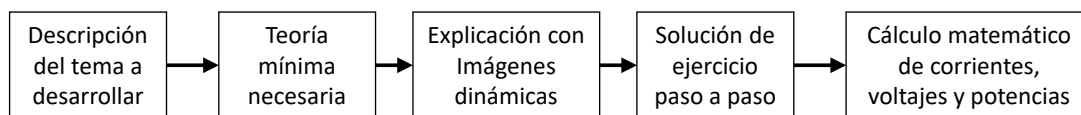


Figura 2 Contenido de información en cada uno de los recursos didácticos propuestos.

### **Software para el desarrollo de recurso didáctico**

Se puede grabar la pantalla de forma fácil, gratuita y sin la instalación de ningún tipo de software en la computadora directamente en línea desde internet con la aplicación “*ScreenCast-O-Matic*” (*ScreenCast*) [4]. La desventaja de esta alternativa es precisamente que se debe tener una conexión directa y un servicio de internet de alta velocidad para poder funcionar de manera adecuada. Sin embargo, existen otras alternativas que se pueden emplear si se descargan de forma gratuita de la red para poder grabar la pantalla de la computadora y con las

que no es necesario tener la computadora conectada a internet. Un ejemplo de este tipo de software es el “aTube-Catcher” que funciona igual que el software anterior y además cuenta con otro tipo de aplicaciones que también pueden ser de utilidad como apoyo a la docencia [5]. En este trabajo, los tres primeros recursos didácticos fueron realizados utilizando *Screencast-O-Matic* y el resto de recursos, por la practicidad de poder trabajar desde cualquier lugar sin necesidad de conexión a internet, fueron desarrollados con *aTube-Catcher*. En la figura 3 se muestra la pantalla de control para el *Screencast-O-Matic*, y en la figura 4 se muestra la pantalla de control para el *aTube-Catcher*.

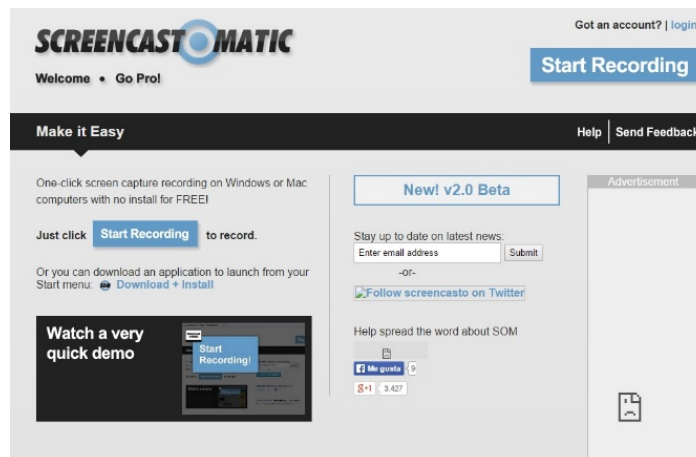


Figura 3 Aspecto de la pantalla de control del *Screencast-O-Matic*.

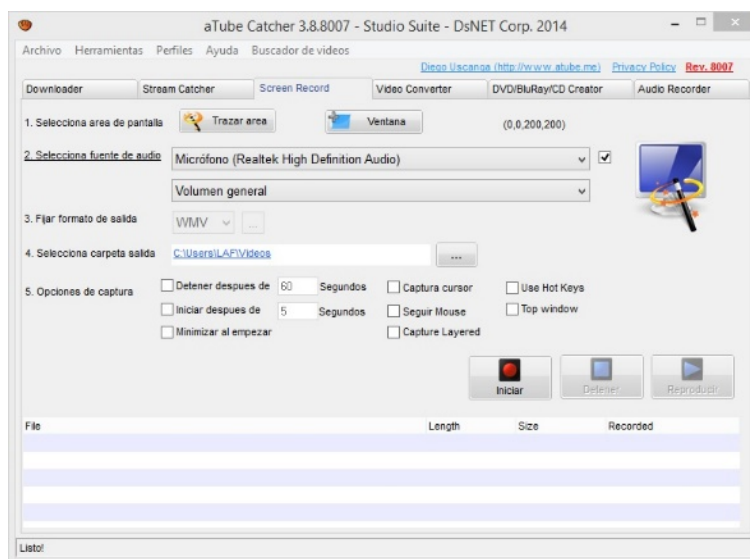


Figura 4 Aspecto de la pantalla de control del *aTube-Catcher*.

## **Recurso didáctico en las redes sociales**

Las Redes Sociales como MySpace, LinkedIn y Facebook que aparecieron en 2003 y esta última alcanzando un crecimiento de 400 millones de usuarios registrados para 2009 y de 1,000 millones de usuarios en 2012 en el mundo [6], no solo aparecieron y crecieron sin registrar ningún impacto en los usuarios. Estas han modificado la manera en cómo las personas hoy en día buscan y comparten información. Así como también han motivado a muchas otras personas a compartir múltiples temas y experiencias que para otros les resultan de interés o utilidad. Existen redes sociales como lo es YouTube [7] en la que prácticamente se puede encontrar cualquier tema desarrollado en vídeo para poder ser consultado y/o aprendido por cualquier persona en el mundo. Es en esta última, y por las características que tienen los recursos didácticos desarrollados, en donde se recomienda alojarlos para su clasificación y consulta. Esta red cuenta por si misma con un sistema muy amigable de gestión de archivos de audio y vídeo. Con este sistema se puede llevar un control de cuántos recursos didácticos se han almacenado, llevar un conteo de cuántas veces y por cuánto tiempo se han reproducido y desde qué lugares del mundo se accede también. Lo más importante, además de lo ya mencionado, consiste en tener la posibilidad de hacer crecer una red de internautas (YouTubers) que sigan de cerca la publicación de nuevos recursos didácticos al momento que estos son compartidos en la red. En esta red se cuenta con la posibilidad de registrar preguntas, comentarios y/o retroalimentaciones por parte de la comunidad que hacen de este ejercicio una oportunidad para seguir creciendo y desarrollando recursos que sean cada vez de mayor calidad. Otra ventajas que tienen los estudiantes al tener esta información disponible en una red social, es que siempre está disponible y puede ser reproducida cuantas veces sea necesario hasta conseguir que sea entendida en su totalidad y al ritmo que cada uno necesita. Por las características con las que resultan los recursos didácticos generados, se puede utilizar cualquiera de las redes sociales que hoy en día se conocen, tales como facebook, twitter, instagram, entre otras sin embargo

YouTube cuenta con las características adecuadas para un buen ordenamiento, consulta y proliferación en la red.

### 3. Resultados

Un canal de YouTube que lleva por nombre “Luis Flores Circuitos” se ha puesto en operación para alojar los recursos didácticos que hasta el momento se han desarrollado desde hace un año aproximadamente (figura 5). Del mismo modo hasta el momento se han suscrito en el canal de YouTube 836 internautas interesados en conocer los recursos didácticos que aquí se presentan. La Tabla 1, muestra un listado de los temas que se han desarrollado en orden cronológico desde el inicio del canal y hasta el día de hoy. En esta tabla se destaca que los dos primeros temas desarrollados fueron análisis de circuitos eléctricos utilizando el Método de Mallas y el Método de Nodos. Estos dos métodos son los más visitados para el análisis de circuitos eléctricos en el campo de la ingeniería, por lo tanto es indispensable que sean tratados con profundidad y claridad. En la tabla 1 se aprecia que el número de vistas es muy desproporcional, esto se debe a que los últimos de los recursos llevan un tiempo aproximado de 1 a 2 meses frente a los tres primeros recursos que ya llevan de 11 meses a 1 año de haber sido colocados en la red para su reproducción.



Figura 5 Canal de YouTube para alojar los recursos didácticos.

Tabla 1 Temas explicados en cada recurso didáctico.

Recurso	Tema desarrollado	No. de vistas
01	Mallas en circuitos eléctricos de CD	66,293
02	Nodos en circuitos eléctricos en CD	63,615
03	Dos Mallas en circuitos eléctricos de CD	2,049
04	Fuente de voltaje y fuente de corriente resuelto con mallas	792
05	Mallas con fuentes de corriente en CD	514
06	SuperMalla en CD	744
07	SuperNodo	1,139
08	SuperNodo con mallas	496
09	Teorema de Thevenin en CD	927
10	Teorema de Thevenin en CD Ejemplo 2	727
11	Teorema de Norton en CD	733
12	Teorema de Norton en CD Ejemplo 2	361

La mayoría de los comentarios, preguntas y sugerencias que han recibido los recursos didácticos desde su aparición en la red son de carácter positivo, es decir, reflejan la conformidad y satisfacción de los usuarios al reproducir dichos recursos. De igual manera, algunas sugerencias han surgido a lo largo de este tiempo que se pueden tomar en consideración para hacer y mejoras en los recursos didácticos. La tabla 2 presenta algunas de las sugerencias del primero de los recursos que se presentó desde hace más de un año.

Tabla 2 Sugerencias realizadas al recurso didáctico 01 por parte de los usuarios.

Recurso	Sugerencias
01	<p><i>A mí me lo habían enseñado poniendo el signo por donde sale la corriente y no por donde entra.</i></p> <p><i>Una sugerencia, para sacar los valores de las corrientes que circulan en las mallas se puede utilizar el método Montante, es muy poderoso ese método.</i></p> <p><i>Solo te faltó agregar que el signo negativo de la corriente implica que supusimos de forma errónea su dirección.</i></p>

#### 4. Discusión

El desarrollo de este tipo de recursos tiene un impacto favorable en la red ya que ayuda a los estudiantes a revisar temas que les resultan complicados y lo pueden hacer a cualquier hora del día y desde cualquier lugar con acceso a internet. Los comentarios y sugerencias dejan ver la satisfacción que encuentran los usuarios al utilizar este tipo de recursos y cómo a pesar de tener poco tiempo, ya se han alcanzado y superado las 60,000 reproducciones en los dos primeros

recursos desarrollados. Este tipo de recurso, como cualquier recurso en línea, tiene la facilidad de ser consultado asincrónicamente por los usuarios, es decir, cualquier día y a cualquier hora que cada usuario disponga.

## **5. Conclusiones**

Se presentó el desarrollo de un recurso didáctico que se puede encontrar al alcance de cualquier profesor que desee incursionar en las redes sociales. Este recurso está realizado por una presentación de Power Point adicionada con el audio de quien explica la presentación. La intención principal de este recurso es tener disponible para las nuevas generaciones de estudiantes, alternativas que sean de atracción para los temas que son cada vez más complejos. Una forma económica, computacionalmente hablando, se presenta para que los profesores puedan hacer recursos atractivos para los alumnos de hoy en día. Existen distintas alternativas de software libre para poder desarrollar recursos didácticos que sean de verdadero impacto para las nuevas generaciones. Se presentó el esquema general para el desarrollo de los prototipos didácticos así como una sugerencia de los contenidos que la presentación de Power Point debe incluir para garantizar que los alumnos comprendan la profundidad los temas explicados. También se presentan los resultados que se han alcanzado en apenas un año con tres recursos didácticos dejando de manifiesto que los principales temas que buscan los alumnos se refieren básicamente a los temas de Mallas y Nodos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] M. L. Crispín, M. C. Doria, A. B. Rivera, M. T. De la Garza, S. Carrillo, L. Guerrero, H. Patiño, L. Caudillo, A. Fregoso, J. Martínez, M. Esquivel, M. Loyola, Y. Costopoulos, M. J. Athié, Aprendizaje Autónomo. Orientaciones para la docencia. Primera edición. 2011. Universidad Iberoamericana. México.
- [2] Nativos e inmigrantes digitales. Cuadernos SEK 2.0. <http://www.marcprensky.com/writing/Prensky-NATIVOS%20E%20INMIGRANTES%20DIGITALES%20%28SEK%29.pdf>. Mayo de 2015.

- [3] La educación 3.0 y las redes sociales en el aula. <http://scopeo.usal.es/enfoque-bol-63-la-educacion-3-0-y-las-redes-sociales-en-el-aula/#sthash.cxuqVNPf.4WkxMBu.dpuf>. Mayo de 2012.
- [4] Screencast, Screencast-O-Matic <http://www.screencast-o-matic.com/>. Julio de 2015
- [5] ATube software, aTube Catcher 3.8. <http://www.atube.me/video/>. Julio de 2015.
- [6] R. Valenzuela, “Las redes sociales y su aplicación en la educación”. Revista Digital Universitaria. ISSN: 1607- 6079. Vol. 14. No. 4. 1 de abril de 2013.
- [7] YouTube. [www.youtube.com](http://www.youtube.com). Julio de 2015.

## **7. Autores**

Luis Alejandro Flores Oropeza nació en Aguascalientes, México en 1976, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico por parte del Instituto Tecnológico de Aguascalientes y el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica por la Universidad Politécnica de Madrid en España en 1999 y 2005 respectivamente. Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus intereses se centran en el estudio de las fuentes de alimentación conmutadas, corrección del factor de potencia y control.

Alejandro Román Loera, profesor investigador de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Edgar López Delgadillo. Graduado de Ingeniería en Electrónica y Sistemas de Comunicación Digital por la Universidad Autónoma de Aguascalientes en 2002. Obtuvo los grados de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2004 y 2010 respectivamente. Actualmente es profesor investigador titular adscrito al Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus principales áreas de interés son el diseño de circuitos integrados analógicos y en modo mixto y los sistemas adaptables digitales y analógicos.



# MÓDULO DIDÁCTICO DE TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE OBJETOS

***Miguel Magos Rivera***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

***Ricardo Godínez Bravo***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*rgb@correo.azc.uam.mx*

***Marco Antonio Viguera Cabrera***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*al208331423@alumnos.azc.uam.mx*

***José Antonio Lara Chávez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*jalch@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

En este artículo se describe el diseño y la construcción de una banda transportadora modular y portátil para su uso como apoyo didáctico en cursos de automatización de procesos. El prototipo desarrollado tiene una longitud de 70 cm de largo con 16.5 cm de ancho, su peso es de 1500 g.; estas características hacen que sea fácil de manipular. La banda es accionada por un motor de pasos pudiéndose controlar su avance, retroceso y velocidad. Cuenta una barra de soporte sobre la cual se montan de forma muy simple dispositivos tales como: desviadores, lectores de códigos de barra y sensores de proximidad, entre otros. Las señales digitales de activación del motor y del desviador, así como las que generan los sensores, se encuentran normalizadas a 24 VDC, haciendo a éste compatible con la mayoría de los equipos de control industrial. Tres sistemas como el que se describe, se encuentran en uso y han demostrado ser un apoyo

en cursos de automatización, microcontroladores y electrónica de potencia entre otros.

**Palabra(s) Clave(s):** Prototipos didácticos, Automatización, Banda transportadora, Motores a pasos, Controladores Lógicos Programables

## **1. Introducción**

El avance presentado en las últimas décadas por los dispositivos de estado sólido, ha permitido que la relación beneficio costo de los equipos empleados en el control y la automatización de procesos se incremente. Una mayor capacidad de procesamiento, incremento en la velocidad de respuesta, algoritmos de control más avanzados y mayores opciones para comunicarse con otros dispositivos, son solo algunas de las características que cada día son más comunes encontrar en los equipos [1, 2, 3]. Lo anterior, aunado a la presión creciente por mejorar los procesos productivos, ha provocado que las empresas del país busquen incrementar el grado de automatización en sus equipos. Esta situación conlleva la necesidad creciente de recursos humanos capacitados en estas tecnologías. Conscientes de esta situación, las escuelas y facultades de ingeniería están incluyendo cursos relacionados con esta área del conocimiento en sus planes de estudios. Diversos trabajos de investigación educativa se han publicado en los cuales se subraya la importancia que tiene el trabajo práctico como apoyo para la comprensión de los conceptos teóricos en ingeniería [4, 5, 6]. Lo anterior implica que las universidades cuenten en sus laboratorios con equipos experimentales que permitan a los alumnos el manejo de dispositivos similares a los que encontrarán durante el ejercicio de su actividad profesional. Dados los altos costos que la mayoría de estos equipos tienen, una opción que diversas instituciones en México y el mundo han explorado es la del autoequipamiento. En la bibliografía se pueden encontrar trabajos sobre simuladores físicos para la experimentación en procesos a escala de laboratorio [7, 8, 9]. Los simuladores virtuales tienen una gran aceptación dada su facilidad de manejo y su bajo costo [10, 11, 12]. También se tienen los laboratorios a distancia, en donde el simulador se encuentra en un lugar y el usuario en otro [13, 14].

Bajo esta idea, se decidió diseñar y construir un sistema modular basado en una banda transportadora de pequeñas dimensiones el cual, mediante diversos dispositivos instalados, permitiera el movimiento y clasificación de objetos.

Al momento de redactar este documento se cuenta con tres equipos como el que aquí se describe. Estos serán utilizados en el siguiente trimestre lectivo como apoyo en los cursos de Controladores Lógicos Programables que se impartirán a estudiantes de la Licenciatura en Ingeniería Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

En la segunda sección de este documento se describen las características principales del sistema desarrollado y se presentan las grandes partes que lo conforman. Las cuatro secciones siguientes describen el diseño y la construcción de las partes mecánicas del dispositivo. La sección 7 expone la implementación del Circuito Electrónico de Control que permite el accionamiento de los motores empleado en la construcción del prototipo. La sección 8 del artículo muestra los resultados obtenidos, así como un ejemplo de aplicación empleando un PLC y monitoreando el proceso por medio de una pantalla gráfica. Finalmente, en la última sección del trabajo se presentan las conclusiones, así como el trabajo a futuro.

## **2. Descripción general del prototipo desarrollado**

La banda transportadora que se describe en este documento fue diseñada para cumplir con necesidades específicas de espacio de los laboratorios de electrónica de la UAM-Azcapotzalco. Las limitaciones que la institución tiene en sus espacios obligan a tener equipos didácticos que sean portátiles, esto es, que puedan ser almacenados mientras no se emplean y que sean fáciles de instalar por los usuarios cuando se requiera su uso. Así mismo, se buscó que el sistema diseñado tuviese la flexibilidad de tener distintas configuraciones para poder, con un solo equipo, servir de apoyo didáctico en varias prácticas de cursos diversos. En la figura 1, se puede observar una vista del prototipo desarrollado con una serie de aditamentos desmontables que permiten modificar la configuración del equipo.

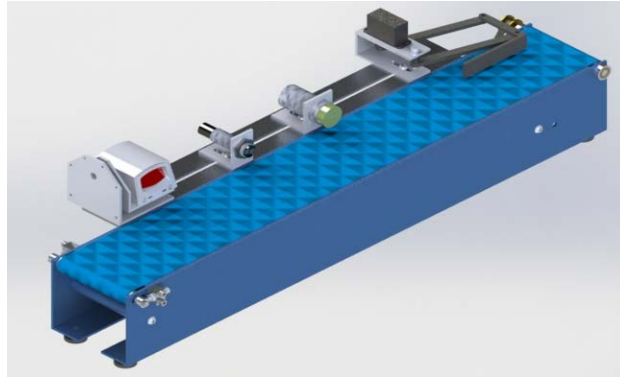


Figura 1 Vista del sistema desarrollado.

El prototipo tiene las siguientes dimensiones: 700 mm de largo, 165 mm de ancho y 115 mm de altura. La banda empleada es de lona y la tracción de la misma se realiza mediante un motor a pasos. Se diseñó un circuito electrónico que permite el control del motor para que la banda pueda, mediante señales digitales de entrada, avanzar, retroceder o detenerse. Se tiene una barra ranurada en la cual se pueden colocar diversos sensores de proximidad, así como lectores de código de barras. El sistema cuenta con un desviador de objetos, el cual también es accionado por una entrada digital.

La estructura de soporte, así como la mayoría de las partes mecánicas del sistema, fueron construidas en aluminio buscando de esta forma disminuir el peso del equipo completo. Para una mejor explicación de las partes que componen el sistema desarrollado, se ha dividido este en cinco grandes bloques:

- Sistema de Transmisión
- Desviador
- Soporte de Accesorios
- Estructura de Soporte
- Circuito Electrónico de Control

Los cuatro primeros bloques constituyen la parte mecánica del dispositivo, mismos que se observan en explosión en la imagen de la figura 2.

Los bloques que integran el sistema mecánico, así como el Circuito Electrónico de Control se describirán en las siguientes secciones del artículo.

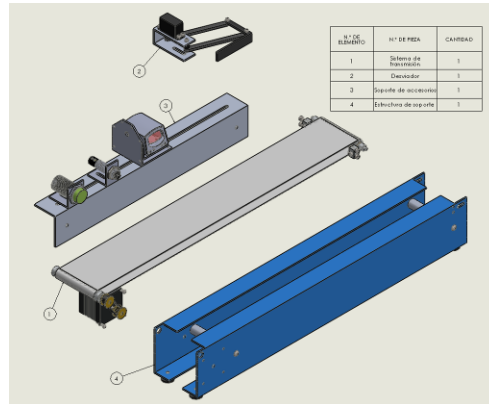


Figura 2 Explosionado del sistema mecánico de la banda transportadora.

### 3. Sistema de transmisión

Este bloque es el encargado de mover el objeto sobre la banda transportadora, sus elementos pueden ser agrupados en tres grandes partes: Sistema de Tracción, Eje de Libre Movimiento y Banda de Lona. En figura 3 puede observarse el sistema de transmisión completo, mientras que en figura 4 se tienen sus bloques en explosión.

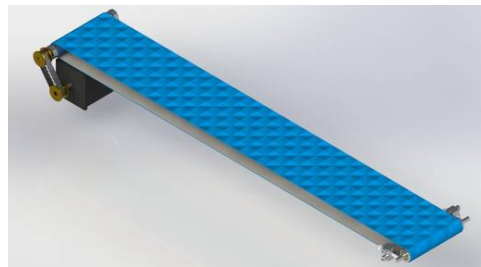


Figura 3 Sistema de transmisión.

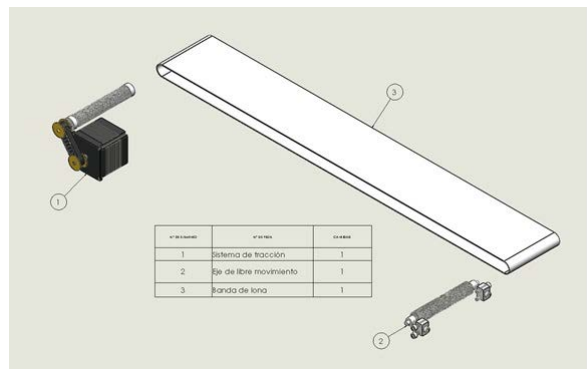


Figura 4 Sistema de transmisión en vista explosionada.

**Sistema de tracción.** Este es el subensamble encargado de proporcionar movimiento a la banda de lona. La base de este mecanismo es un motor a pasos modelo WO 5718M-02 de la marca Lin Engineering; se trata de motor bipolar NEMA 23, de 1.8° por paso, 2.1 A y torque de 1.22 N-m. Mediante un juego de poleas y una banda dentada, el movimiento del motor es transmitido a un eje metálico sobre el cual se encuentra la banda de lona. Para disminuir la fricción, el eje se encuentra montado sobre rodamientos colocados en la estructura de soporte. En la imagen que se muestra en la figura 5, se observan las partes que componen este subensamble.

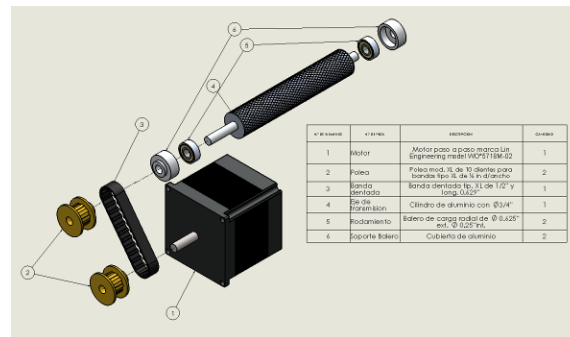


Figura 5 Componentes del sistema de tracción.

**Eje de libre movimiento.** Para lograr el movimiento adecuado de la banda, se cuenta con un eje adicional de libre movimiento, el cual, al igual que el de tracción, se encuentra montado en baleros. Con el fin de ajustar el movimiento de la banda de lona, se integró un sistema de tensado que permite alinear esta con la estructura de soporte, y de esta forma evitar algún bloqueo. En la imagen que se muestra en la figura 6, se observan las partes que componen este subensamble.

**Banda de lona.** Este elemento está elaborado en poliuretano con baja fricción en su superficie exterior para evitar deslizamientos del objeto que transporte.

#### 4. Desviador

Con el fin de que los sistemas de control que se conectarán al equipo puedan seleccionar objetos diferentes, lo anterior a partir de las señales que los

sensores, el sistema cuenta con un desviador (figura 7). Este dispositivo se diseñó en base a un mecanismo de 4 barras que, impulsado por un servomotor, permite desplazar perpendicularmente un objeto que se encuentre sobre la superficie de la banda. El servomotor utilizado es de la marca Power HD, modelo 1501 MG Analog Servo. El Circuito Electrónico de Control, cuyo diseño se explica más adelante, se encarga de generar las señales necesarias para que el motor gire el ángulo necesario para desviar la pieza deseada, lo anterior a partir de la recepción de una señal de entrada digital.

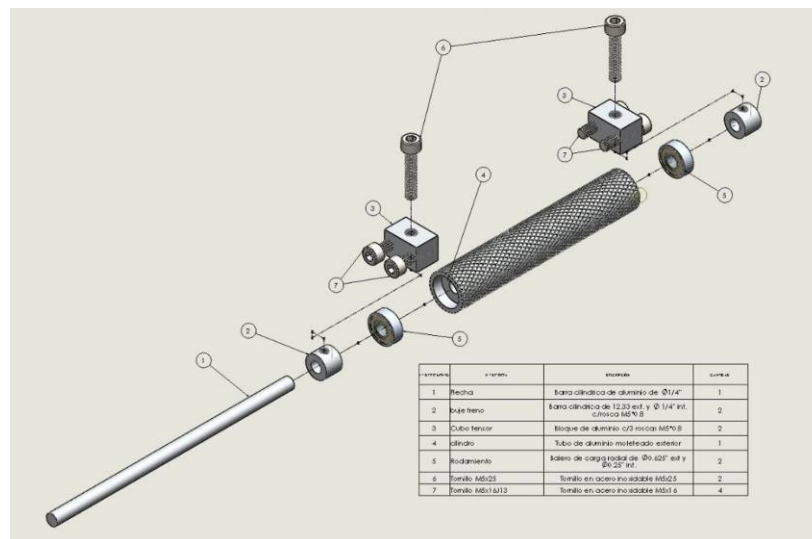


Figura 6 Componentes asociados al eje de libre movimiento.

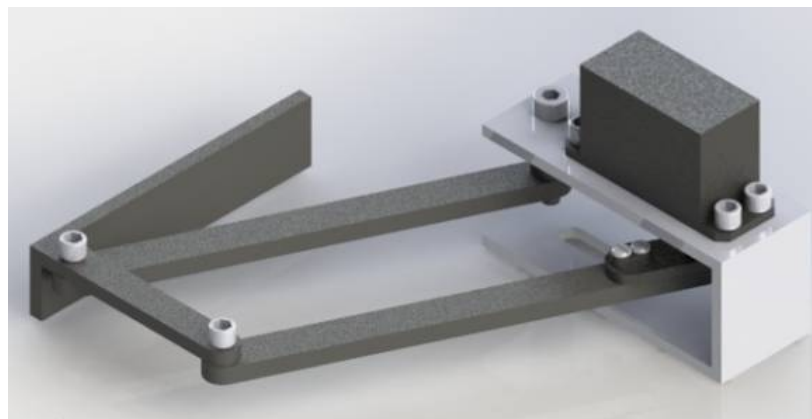


Figura 7 Vista del mecanismo desviador construido.

## 5. Soporte de accesorios

El soporte de accesorios permite la sujeción de forma sencilla de dispositivos tales como: sensores de proximidad, lectores de código de barras, lectores RFID, sensores de color y del desviador descritos en la sección anterior. Básicamente, se trata de un perfil ranurado sobre el cual se colocan los distintos soportes diseñados para cada uno de los elementos y el que a su vez se fija en una de las paredes laterales de la estructura de soporte del equipo. La figura 8 muestra una vista del soporte con algunos de los elementos que pueden colocarse sobre este.

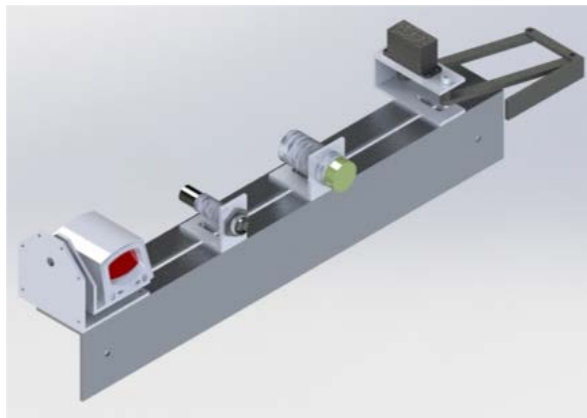


Figura 8 Soporte de accesorios con algunos elementos instalados.

El perfil fue fabricado en placa de aluminio calibre 11 a partir de la cual se formó el ángulo. Para lograr la sujeción al soporte de los elementos que se deseen emplear para un determinado experimento, se diseñaron una serie de bases especiales para cada accesorio. Estas bases son de fácil colocación, lo que permite configurar el sistema de forma sencilla y rápida.

## 6. Estructura de soporte

La estructura de soporte es la encargada de darle estabilidad a todo el sistema, cumpliendo con la rigidez requerida para una correcta rigidez al momento de entrar en funcionamiento. La mayor parte de este bloque está constituido por piezas de aluminio esto con la finalidad de reducir su peso y facilitar el transporte, manipulación o configuración de las bandas



transportadoras. En figura 9 puede observarse la estructura de soporte completa, mientras que en figura 10 se tiene el ensamble en explosión.

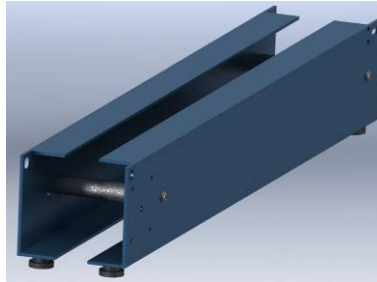


Figura 9 Estructura de soporte.

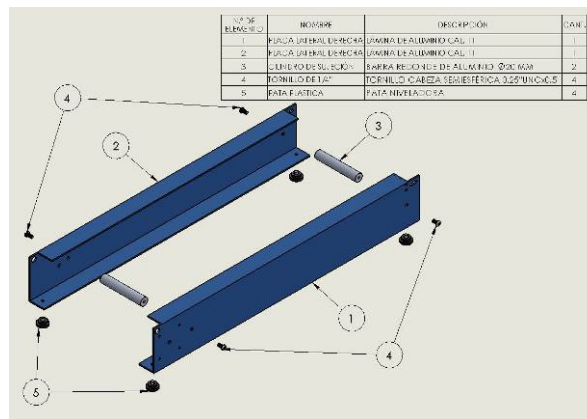


Figura 10 Componentes de la estructura de soporte.

## 7. Circuito Electrónico de Control

En esta sección se describe el diseño e implementación del Circuito Electrónico de Control encargado del control de movimiento y dirección del motor a pasos del sistema de transmisión, así como del servomotor del desviador sobre una banda transportadora. El sistema está basado en la plataforma Arduino UNO, cuenta con una fuente de alimentación externa basada en el CI LM2576, una fuente externa de 24 volts marca PHOENIX CONTACT y un módulo de potencia para motores paso a paso FMD2704A.

En la figura 11 se muestra el diagrama a bloques de esta etapa del prototipo en él se muestran los principales módulos del sistema, mismos que se explican más adelante.

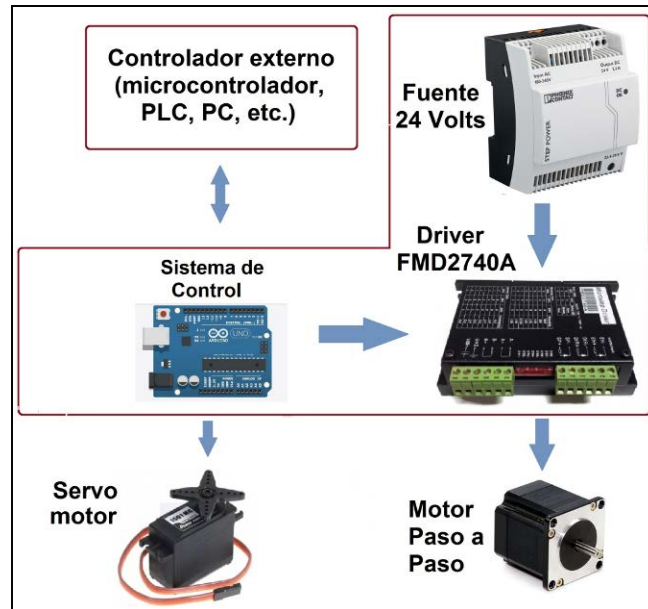


Figura 11 Diagrama a bloques del sistema electrónico.

**Sistema de control.** El diagrama a bloques del circuito electrónico encargado del control se muestra en la figura 12. El elemento central es una plataforma Arduino Uno, cuenta con una fuente regulada para la alimentación de este elemento. El bloque se complementa con un circuito acondicionador de niveles lógicos de 24 a 5 volts para la tarjeta Arduino.

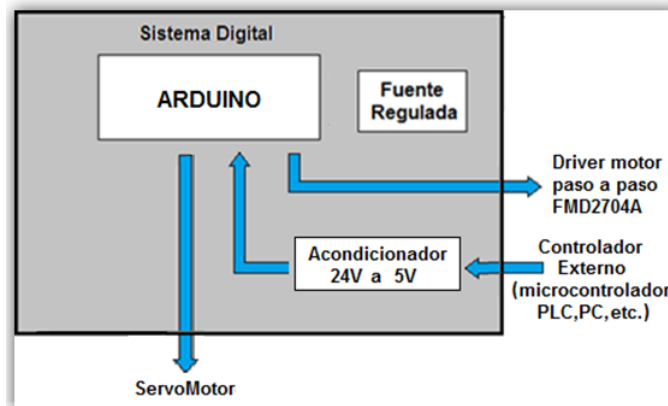


Figura 12 Diagrama a bloques del sistema digital.

En figura 13, se muestra el circuito acondicionador de voltaje diseñado para colocarse sobre la placa del Arduino.

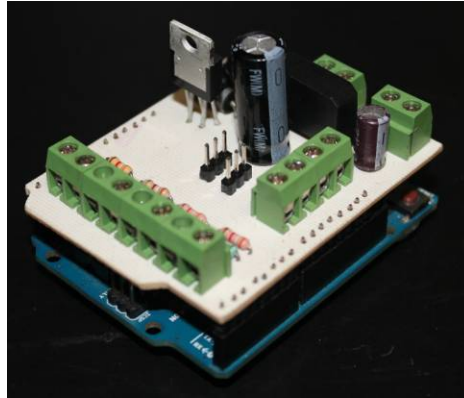


Figura 13 Vista del circuito acondicionador de voltaje colocado sobre la placa de Arduino.

La programación de la placa de Arduino, se realizó con el programa que el fabricante proporciona para este fin. Se elaboraron algoritmos para el control de los desviadores y para la activación y control del sentido de giro de la banda. La figura 14 muestra el diagrama de flujo del programa elaborado para la plataforma Arduino.

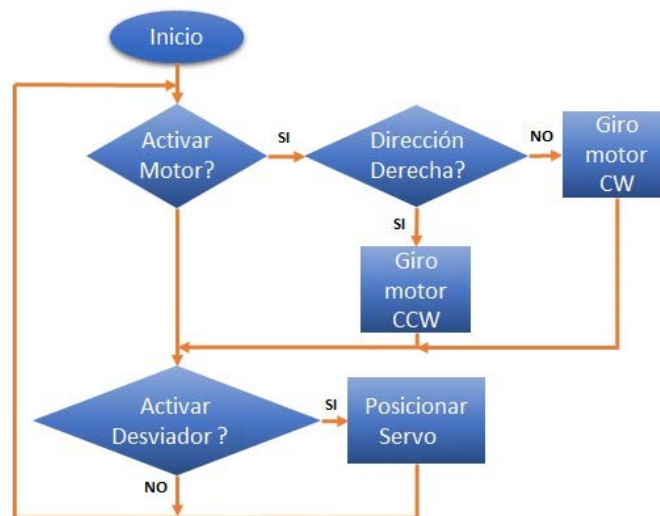


Figura 14 Diagrama de flujo desarrollado para la plataforma Arduino.

**Fuente 24 volts.** Se incluyó una fuente de voltaje de 24 VDC para la alimentación del driver del motor a pasos. Se decidió poner una fuente distinta a la del Arduino para evitar la generación de ruido que afectara a este último. Se

trata de una fuente de 24 volts de corriente directa que proporciona hasta 2.7 amperes, corriente que resulta suficiente para el manejo del motor a pasos.

**Driver FMD2740A.** El módulo FMD2740A es un driver para motor a paso bipolar con corriente inferior a 4 A. La precisión y potencia pueden ser configuradas mediante interruptores. Puede ser controlado mediante una señal de habilitación, otra señal para indicar la dirección de movimiento, ya sea a favor o en contra de las manecillas del reloj y una señal cuadrada cuya frecuencia determina la velocidad de giro del motor. En esta aplicación, es el Arduino el elemento que controla el funcionamiento del módulo de potencia para el motor a pasos, lo anterior con base en las señales de entrada digital que se reciben del dispositivo de control externo.

## 8. Resultados

Al momento de redactar este documento, se tienen en funcionamiento tres equipos como el que aquí se describe. La figura 15 muestra una vista del prototipo en una configuración que incluye dos sensores de proximidad y un desviador.

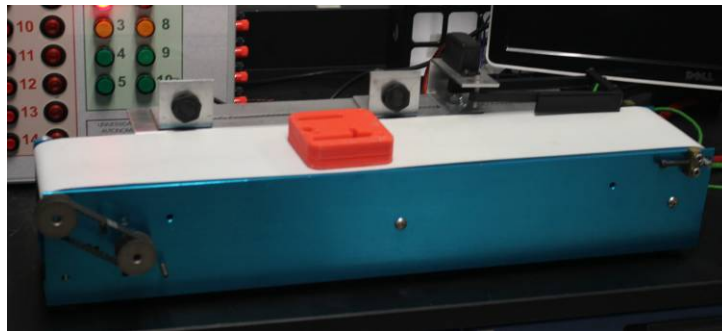


Figura 15 Vista del equipo construido.

Para verificar el funcionamiento correcto del equipo, se propuso un ejemplo en el cual la banda es controlada mediante un tablero didáctico basado en un PLC S7-1200 de la marca Siemens, mismo que cuenta con una pantalla táctil modelo KTP600 del mismo fabricante.

El ejercicio considera una configuración similar a la que se muestra en la figura 16: dos sensores de proximidad y un desviador. Al momento que un objeto es

depositado en la banda, el primer sensor lo detecta, haciendo que la banda inicie su movimiento. Al ser detectado el objeto por el segundo sensor, el desviador se acciona, haciendo que salga de la banda.



Figura 16 Vista de la implementación del ejemplo descrito.

Como se mencionó anteriormente, este sistema puede ser empleado bajo distintas plataformas, una de ellas es con sistemas de Interface Hombre-Máquina. En figura 17, se observa una vista de la pantalla de monitoreo gráfico del tablero didáctico empleado, en la cual se desarrolló una animación en tiempo real que muestra el movimiento de la banda.



Figura 17 Vista de la implementación del interface Hombre-Máquina del ejemplo descrito.

## 9. Conclusiones

En este artículo se describió el diseño y la construcción de una banda transportadora modular para aplicaciones didácticas. Las etapas de construcción del prototipo fueron explicadas, así como las características principales del mismo. Se incluyó a manera de ejemplo, una configuración del sistema para la detección de objetos y el desvío de este de la banda. En el desarrollo del ejercicio pudo comprobarse la facilidad que el sistema tiene para cambiar la configuración del mismo en forma sencilla y rápida. Lo anterior le da versatilidad para poder ser empleado como apoyo en diversas prácticas y con distintas plataformas de control.

Como trabajo a futuro se analizará el impacto que tiene el equipo como apoyo en cursos de Controladores Lógicos Programables. Cabe mencionar que el diseño de otro sistema transportador de características similares, pero esta vez basado en una banda de cadena plástica se encuentra avanzado.

## 10. Bibliografía y Referencias

- [1] J. Payne, "PLC vs. PAC". Control Engineering Magazine. Vol. 60 No. 2. February 2013. Pp 30-32.
- [2] J. Montague, "PLCs Taking some excellent Adventures". Control. Vol. 26 No. 1. January 2013. Pp 71-73.
- [3] S. Natsui, "PLC Developments Increase Flexibility and Speed". Control Engineering Magazine. Vol. 59 No. 8. August 2012. Pp 28-31.
- [4] R. M. Felder, "Learning and Teaching Styles in Engineering Education". Engineering Education. Gainesville, Florida, E.U.A. June 2002.
- [5] R. M. Felder, D. R. Woods, J. E. Stice, A. Rugarcia, "The Future of Engineerin Education II. Theaching Methods that Work". Chemical Engineering Education, Gainesville, Florida, E.U.A. 2000.
- [6] F. Bjarne, E. Tor, "Game Play in Engineering Education – Concept and Experimental Results" Int. J. Engng Ed. Vol. 22. No. 5. 2006. Pp. 1043-1052.

- [7] I. Siller, A. Alcántara, J. Jaimes, I. Ramírez, N. Nájera, "An Educational Level Control System". WSEAS/IASME International Conference on Educational Technologies. Bucharest, Romania. October 2006.
- [8] U. Cortés-Ramírez, J. J. Vásquez-Sanjuan, M. A. Alonso-Pérez, "Plataforma didáctica de control automático basada en un reductor de tensión cd-cd (buck)". *Pistas Educativas*. Instituto Tecnológico de Celaya. No. 108. Octubre 2014. Pp 389-410.
- [9] M. Magos, L. Delgado, "Banco de tanques para realizar prácticas de Laboratorio de Ingeniería Química". XXXIII Encuentro Nacional de la Asociación Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química. San José del Cabo, BCS. México. Mayo 2012.
- [10] İ. Öztel and C. Öz, "Developing a virtual driving simulator for educational purpose". *Balkan Journal of Electrical & Computer engineering*. Vol. 2 No.2. June 2014.
- [11] G. Sánchez-Mares, E. Ortega-Maldonado, I. Castorena- Alvarado, "Implementación de Simulaciones Usando Easy Java Simulations para Laboratorio Virtual". *Avances de Ingeniería Electrónica 2013*. Universidad Autónoma Metropolitana. Pp. 113-121. 2013.
- [12] M. Macías, A. Izaguirre, "Virtual Reality Machines to Improve Training in Automation". Eleventh Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Cancun, México. August 2013.
- [13] C. Pereira, S. Paladini, F. Menine, "Control and automation Engineering Education: combining physical, remote and virtual labs". IEEE 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Chemnitz, Germany. March 2012.
- [14] M. Hincapié, O. Salas, M. Ramirez, B. Carranza, "Implementation of a Teleoperated Didactic Manufacturing Cell through Internet2 as a Means of Engineering Education\*". *International Journal of Engineering Education*. Vol. 29. No 1. 2013. Pp. 1-11.

## **11. Autores**

Dr. Miguel Magos Rivera. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro y Doctor en Control Automático por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia). Actualmente es profesor investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

Ing. Ricardo Godínez Bravo es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana. Actualmente cuenta con el 100% de créditos de la Maestría en Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Ecatepec además de ser profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Marco Antonio Vigueras Cabrera, es estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Mecánica en la Universidad Autónoma Metropolitana.

Ing. José Antonio Lara Chávez. Es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana y actualmente es ayudante del Departamento de Electrónica de la misma Institución.



# MÉTODO PRÁCTICO PARA DISEÑO DE INDUCTORES CON NÚCLEO DE AIRE

***Jerry Nathan Reider Burstin***

Universidad Anáhuac México Norte, Facultad de Ingeniería

*jnreider@anahuac.mx*

## **Resumen**

Por sus características de excelente linealidad, factor de calidad elevado, ausencia de saturación y de las pérdidas propias de los núcleos ferromagnéticos, los inductores con núcleo de aire encuentran numerosas aplicaciones en diversos campos de la tecnología eléctrica. Se les encuentra en limitadores de corriente, redes amortiguadoras en convertidores tiristorizados, igualadores de impedancia, filtros pasivos y para absorción de componentes armónicos, redes de cruce en sistemas de altavoces, etc.

Empero, la ausencia de un núcleo ferromagnético de elevada permeabilidad que contenga al flujo magnético ocasiona la dispersión del mismo. Por ello, la inductancia se torna una función muy compleja de la geometría, dificultando notablemente el diseño de estos componentes partiendo del valor requerido. Además, la información disponible en la literatura técnica especializada carece de un enfoque de diseño.

En este trabajo se presenta una rutina de diseño práctica y fácil de implantar, adaptándola a partir de dicha literatura técnica y sustentándola con un ejemplo práctico. Se acota el enfoque hacia los inductores multicapa con desarrollo de bobina cilíndrica compacta por ser éstos los de uso más frecuente.

**Palabra(s) Clave(s):** Bobina, inductor con núcleo de aire, inductor lineal.

## **1. Introducción**

Un inductor con "núcleo de aire" no depende de la permeabilidad de un material ferromagnético para lograr la inductancia especificada. Más bien, su

inductancia es una función de la concatenación de la corriente que fluye a través del inductor con su propio flujo magnético. Empero, la distribución espacial de este flujo depende muy sensiblemente de la geometría lo cual dificulta notablemente el trabajo de diseño.

Para justificar la necesidad de contar con inductores de este tipo, se examinan brevemente sus ventajas [1]:

- Su inductancia es lineal al no depender de la corriente que fluye a través de él. Esto contrasta con aquellos inductores que contienen un núcleo ferromagnético de permeabilidad elevada. En este último caso, la inductancia alcanza un valor máximo con una excitación moderada, para después disminuir al saturarse el material ferromagnético del núcleo (figura1).

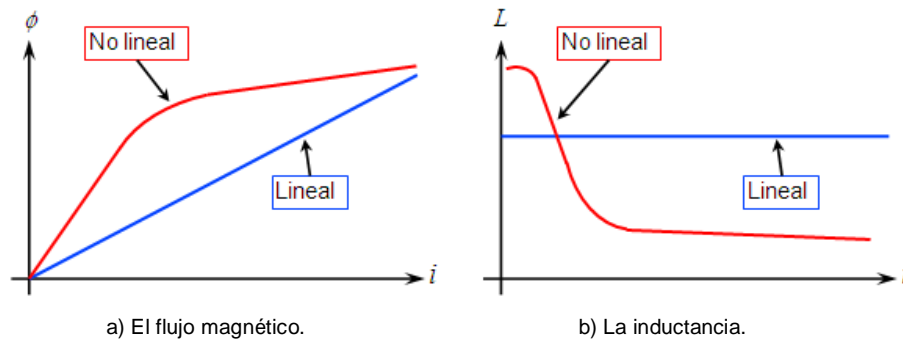


Figura 1 Comparación características inductor lineal y otro no lineal:

- En aplicaciones tales como filtros para convertidores conmutados, la distorsión resultante de la falta de linealidad es tolerable. En cambio, otras situaciones exigen de una linealidad incondicional. Por ejemplo: deberá evitarse la distorsión en las redes de cruce de un sistema de altavoces. O, bien, los inductores de sintonía y adaptación de impedancias en los amplificadores de potencia de radio-frecuencia para los equipos transmisores no deben dar lugar a componentes armónicas como subproducto indeseable de la distorsión.
- En un inductor con núcleo de aire no figuran las pérdidas del material ferromagnético que usualmente afecta a los inductores con este tipo de

núcleos. Esta ventaja adquiere importancia a medida que se incrementa la frecuencia de operación, para la cual el factor de calidad, la eficiencia, la capacidad para manejo de potencia elevada y la ausencia de distorsión son fundamentales.

- La respuesta en frecuencia de los inductores con núcleo de aire es notablemente más extensa comparada con aquellos dotados de un núcleo ferromagnético. Resulta factible diseñar inductores con núcleo de aire capaces de operar a frecuencias del orden de 1.0 gigahertz. En cambio, los inductores con núcleo de ferrita muy difícilmente podrán superar el límite de los 100 megahertz.

Y entre las desventajas se tienen:

- Al no contar con un núcleo de permeabilidad elevada surge la necesidad de construir arrollamientos más grandes y con mayor número de espiras a efecto de alcanzar un cierto valor de inductancia. Para un mismo valor de inductancia, las bobinas con núcleo de aire son más voluminosas, con mayor pérdida en el cobre y mayor capacitancia distribuida, pudiendo provocar la autorresonancia del componente. No obstante, los inductores destinados a frecuencias elevadas suelen requerir de menor inductancia, por lo que este problema es de índole relativa.
- La dispersión magnética hacia el espacio libre hace a un inductor con núcleo de aire más sensible a las interferencias. Y, a medida que la frecuencia se incrementa, de modo que la longitud de onda se torna comparable con las dimensiones geométricas del inductor, el componente comienza a comportarse como una antena emitiendo radiación electromagnética. Esto eleva las pérdidas a un nivel inaceptable.

Podría ser que se recurra a un inductor con núcleo de aire no por su inductancia, propiamente, sino por la naturaleza de su aplicación. Se incluyen aquí aquellos tipos como los sensores de proximidad, las antenas de lazo, las cabezas de los

magnetómetros o las bobinas para calefacción inductiva. Pero, en este caso, el campo externo es justamente lo que sí se requiere.

En la siguiente sección se examinan algunas fórmulas empíricas, mismas que tradicionalmente han encontrado aplicación para el trabajo de diseño de inductores.

## 2. Desarrollo

Para los inductores contruidos con un desarrollo de bobina cilíndrica – también denominada *héliz* o hélice –, los factores que influyen significativamente en la inductancia de éstos son:

- La forma geométrica – también denominada razón de aspecto – misma que se define como la razón del diámetro medio a la longitud. Un inductor largo y angosto (diámetro reducido) no presenta la misma inductancia que otro corto y ancho (mayor diámetro), no obstante ambos posean iguales números de espiras y diámetros interiores, figura 2.

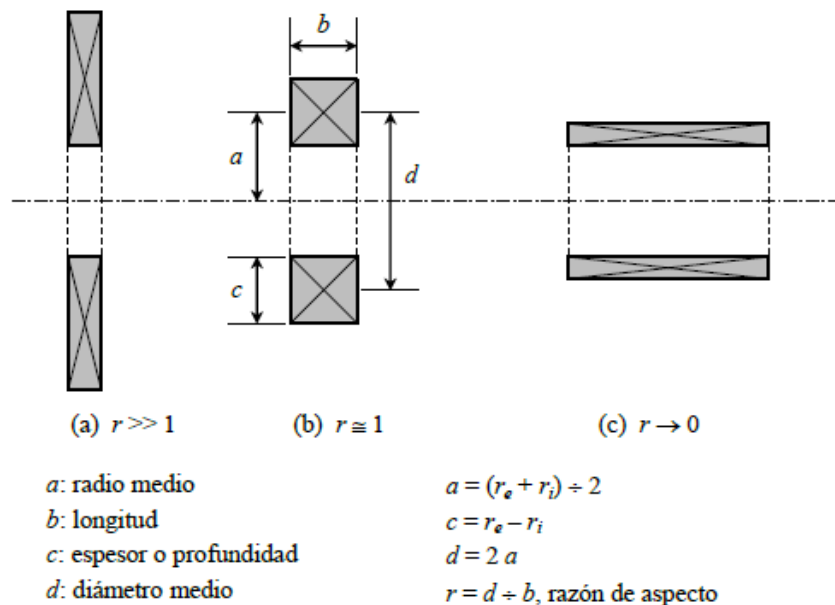
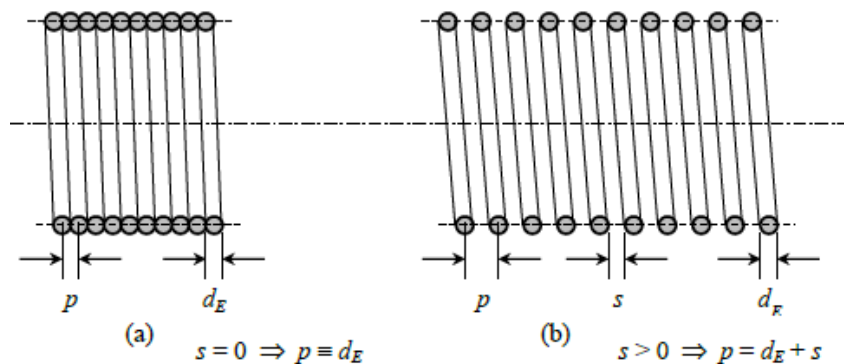


Figura 2 Bobina corta y ancha; Bobina mediana y Bobina larga y angosta.

- Del inciso previo se deduce la influencia ejercida por el número de capas. Al distribuir el mismo número de espiras en un arreglo multicapa para

reducir su longitud (mayor razón de aspecto), el valor de la inductancia sufre variación.

- El espaciado entre espiras. Conforme se ilustra en la figura 3, si en vez de arrollar las espiras en forma compacta se admite una separación entre ellas (menos espiras por unidad de longitud), la inductancia disminuye.
- Otros efectos involucrados son el cortical y el de proximidad, mismos que afectan la distribución de la corriente en el interior del conductor.



$d_E$ : diámetro del conductor esmaltado

$s$ : separación entre espiras

$p$ : paso de la espira;  $p = d_E + s$

$b$ : longitud total;  $b = N \times p$

Figura 3 Solenoides: Arrollamiento compacto y Arrollamiento espaciado.

Los primeros trabajos relacionados con el cálculo de la inductancia para inductores con núcleo de aire se remontan a la conceptualización de la Teoría Electromagnética por J.C. Maxwell hacia mediados del siglo XIX. En 1909, Hantaro Nagaoka, profesor de física en el Colegio de Ciencia de la Universidad Imperial de Tokio [2], establece a la inductancia como dada por la expresión de la ecuación 1 – adaptada a unidades del Sistema Internacional (SI):

$$L = \frac{1}{b} \mu_0 KN^2 A \quad (1)$$

Dónde:

$L$  Inductancia, en henrys.

$b$  longitud total del arrollamiento, en metros.

- $\mu_o$  Permeabilidad del vacío.
- $K$  constante de Nagaoka. Ésta se discute en el párrafo siguiente.
- $N$  Número total de espiras.
- $A$  Área de sección transversal del inductor, normal al eje ( $m^2$ ).

Aunque el tratamiento matemático detallado se ubica más allá del enfoque del presente artículo, la relevancia del trabajo realizado por Nagaoka estriba en la determinación del coeficiente  $K$  en términos de la razón de aspecto (figura 2) del solenoide, así como su listado en una serie de tablas incluidas al final de la sección III – [2, páginas 31 a 33].

La idea consiste en que, dado un cierto solenoide con determinadas dimensiones y número de espiras, el problema – originalmente muy complejo – se reduce a consultar el valor del coeficiente requerido en las tablas y llevar a cabo una sencilla operación de multiplicación.

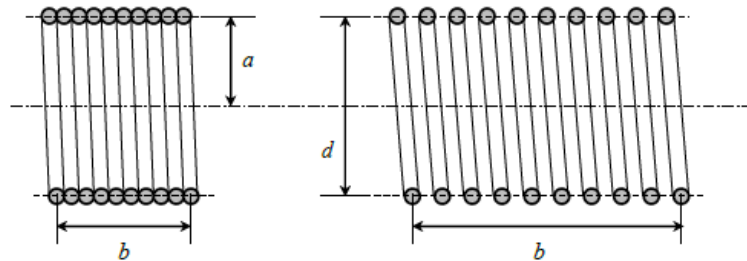
El inconveniente principal de este enfoque se centra en cuanto a que se resuelve el problema de análisis. Es decir, dado el solenoide ya construido se puede encontrar su inductancia. Pero el proceso complementario de diseño – determinar las dimensiones y el número de espiras dada la inductancia deseada – no resulta trivial.

En 1928 y en el transcurso de su trabajo en la Corporación Hazeltine de los Estados Unidos de Norteamérica, el ingeniero eléctrico Harold Alden Wheeler publicó otro trabajo muy sencillo pero cuyo enfoque facilitó aún más el proceso para el cálculo de la inductancia [3]. Para ello, adaptó el coeficiente de Nagaoka expresando la inductancia mediante fórmulas empíricas que fueran más fáciles e inmediatas de utilizar, aunque obteniendo un resultado aproximado.

En las figuras 4, 5 y 6, así como en las ecuaciones asociadas, se detallan algunas de estas fórmulas empíricas conforme a Wheeler [3], mismas que fueron adaptadas para unidades del Sistema Internacional. Éstas corresponden a las construcciones de inductores con núcleo de aire más comúnmente utilizadas:

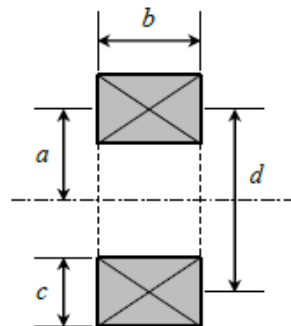
Con el paso del tiempo, fueron publicados diversos trabajos, entre los cuales se citan algunos publicados recientemente [4, 5], así como calculadoras interactivas

accesibles en Internet [6]. Pero, al igual que con el trabajo de Nagaoka, el principal inconveniente de todas estas realizaciones estriba en la dificultad para aplicar estas ecuaciones a un procedimiento de diseño practicable.



$a$ : radio medio  
 $b$ : longitud total  
 $d$ : diámetro medio;  $d = 2a$   
 $N$ : Número total de espiras

Figura 4 Inductor del tipo solenoide corto con una sola capa.



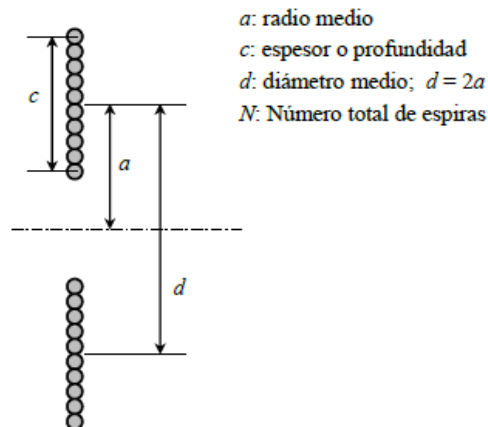
$a$ : radio medio  
 $b$ : longitud  
 $c$ : espesor o profundidad  
 $d$ : diámetro medio  
 $N$ : número total de espiras

$$a = (r_e + r_i) \div 2$$

$$c = r_e - r_i$$

$$d = 2 a$$

Figura 5 Inductor multicapa con arrollamiento compacto.



$a$ : radio medio  
 $c$ : espesor o profundidad  
 $d$ : diámetro medio;  $d = 2a$   
 $N$ : Número total de espiras

Figura 6 Inductor del tipo espiral plana.

En todas las ecuaciones dadas a continuación y en conformidad con el Sistema Internacional de Unidades, la inductancia se expresa en henry y los parámetros geométricos en milímetros por la facilidad para medirlos en esos términos:

- Solenoides de corta longitud con una sola capa (figura 4); Tipo de inductor muy frecuentemente utilizado para bobinas de sintonía, de adaptación de impedancia o bobinas de choque (*choke*) en transmisores de radiofrecuencia, ecuación 2.

$$L = \frac{1.0 \times 10^{-6} N^2 a^2}{228.6a + 254.0b} \quad (2)$$

- Bobina multicapa con arrollamiento compacto (figura 5); Tipo de inductor muy frecuentemente utilizado para filtros pasivos en circuitos de baja frecuencia (audio), redes de cruce en sistemas de altavoces o para absorción de componente armónicos en convertidores de potencia, ecuación 3.

$$L = \frac{1.0 \times 10^{-6} N^2 a^2}{190.50a + 285.75b + 317.50c} \quad (3)$$

- Espiral plana (figura 6); Tipo de inductor recomendado para ubicaciones con espacio reducido o, bien, para construir bobinas amortiguadoras limitadoras de la razón de incremento de la corriente ( $di/dt$  – suavizar la conmutación) en convertidores de potencia tiristorizados. Por su estructura constructiva, este tipo de bobina se presta en forma ideal para utilizar solera rectangular embobinada "de plano" en aquellas aplicaciones con intensidad de corriente muy elevada, ecuación 4.

$$L = \frac{1.0 \times 10^{-6} N^2 a^2}{203.2a + 279.4c} \quad (4)$$

Al observar los inductores multicapa, se aprecia que la existencia de los tres parámetros geométricos  $a$ ,  $b$  y  $c$  da lugar a una cantidad ilimitada de opciones de diseño. Ante ello, H.B. Brooks de la Oficina de Estándares de los Estados



Unidos de Norteamérica desarrolló en 1931 un estudio tendiente a determinar el caso óptimo de inductor como parte de un proyecto para la fabricación de estándares de inductancia [7]. Para ello, se procuró establecer aquella combinación de valores que diera lugar a la máxima inductancia posible, fijada una cierta longitud total de desarrollo del alambre utilizado.

Con base en estudios previos referentes a los métodos para el cálculo de la inductancia [J.C. Maxwell, E.B. Rosa, F.W. Grover], se hubo determinado que, para una sección cuadrada ( $b = c$ ), el diámetro medio de la bobina debe equivaler a 2.95 veces la longitud del arrollamiento ( $2a = 2.95b$ ), ver figura 2. Empero, dado que el máximo en la curva de inductancia  $L = f(b/a)$  es muy plano, se estableció el coeficiente 3.00 como el más conveniente ( $2a = 3.00b$ ). De lo anterior y conforme al esquema de la figura 7, Brooks determinó que la siguiente combinación de parámetros geométricos conduce al inductor óptimo [1, 7].

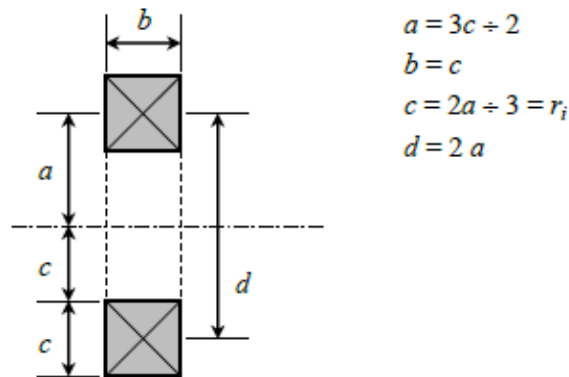


Figura 7 Inductor óptimo conforme a Brooks [1, 7].

Se observa en la figura 7 que ahora el arrollamiento posee una sección cuadrada, ecuación 5.

$$b = c \quad (5)$$

Así mismo, el radio interior de la bobina es tal que posee la misma área que la sección transversal cuadrada del arrollamiento, ecuación 5.

$$a = \frac{3c}{2} \Rightarrow c = \frac{2a}{3}, \quad (6)$$

Partiendo de la ecuación 4, correspondiente al inductor multicapa de Wheeler, sustituyendo las restricciones dadas en ecuaciones 5 y 6, trabajando con un procedimiento algebraico y realizando todas las conversiones numéricas, se llega a ecuación 7.

$$L = 1.68729 \times 10^{-9} N^2 a \quad (7)$$

En el estudio de Brooks de 1931 se reporta un valor de  $1.683 \times 10^{-6}$  para el coeficiente numérico, con la inductancia dada en henrys y el radio medio en milímetros.

Cabe señalar que para este caso particular de inductor óptimo, también existe una versión de calculadora interactiva, accesible en Internet [8].

Se concluye esta sección señalando que, en todos los casos estudiados, así como en las calculadoras interactivas, se le pide al usuario especificar las dimensiones geométricas y el número de espiras con miras a obtener el valor de la inductancia. Es decir, se resuelve el problema del análisis. Pero el proceso de diseño, consistente en determinar el número de espiras, así como las dimensiones geométricas para lograr una inductancia determinada, no es resuelto. La sección subsiguiente resuelve este inconveniente adaptando la ecuación (7) a un enfoque propio de diseño.

### 3. Discusión

Es importante señalar que a todo valor de inductancia necesariamente debe asociarse la especificación de intensidad de corriente  $I$  que habrá de fluir a través del componente. A partir de esta magnitud se elige el calibre adecuado de alambre conductor.

Aun cuando no se pretende llevar a cabo un estudio de ampacidad, es posible afirmar que – para todo fin práctico y tratándose de inductancias que manejen una potencia reactiva no mayor a varias decenas de kilovolt-amperes reactivos –

una densidad de corriente de 4.0 amperes por milímetro cuadrado resulta adecuada. Más, todavía, en vista que la densidad de corriente recomendada para las instalaciones eléctricas a baja tensión se ubica en un rango aproximado de 7.5 amperes por milímetro cuadrado [tabla 310-16 en 9]. En caso de que lo exija la aplicación es factible llevar a cabo un análisis más detallado de los gradientes térmicos esperados y la elevación de temperatura.

De esta suposición, se obtienen las ecuaciones 8 y 9 de la sección transversal de cobre y del diámetro del conductor desnudo, respectivamente. Siendo  $I$  la corriente en amperes y  $J$  la densidad de corriente:

$$A_{cu} [\text{mm}^2] = \frac{I}{J}, \quad (8)$$

$$d_D [\text{mm}] = \sqrt{\frac{4}{\pi} A_{cu}}, \quad (9)$$

Con ello, a partir de la ley logarítmica de variación inversa, propia del sistema AWG [9], se estima el calibre requerido, ecuación 10.

$$AWG = 36 - 39 \frac{\log\left(\frac{d_D}{0.127}\right)}{\log(92)}, \quad (10)$$

Esta operación entrega un valor no entero. Por tanto, se aproxima al entero más cercano para encontrar el diámetro corregido para el alambre desnudo, ecuación 11.

$$d_D [\text{mm}] = 0.127 \times 92^{\left(\frac{36-AWG}{39}\right)}, \quad (11)$$

El diámetro del alambre esmaltado depende del sistema de aislación – simple o doble – con que cuenta el conductor. En las ecuaciones 12 y 13 se presentan las funciones correspondientes, mismas que resultan de los ajustes por regresión lineal aplicadas a las tablas de los datos del fabricante [10].

$$\text{Simple:} \quad d_E [\text{mm}] = 1.01110 d_D [\text{mm}] + 0.01657, \quad (12)$$

$$\text{Doble:} \quad d_E [\text{mm}] = 1.02276 d_D [\text{mm}] + 0.03248, \quad (13)$$

Ya conocido el diámetro del alambre esmaltado, se procede a expresar la sección transversal de la bobina en los términos  $b$  y  $c$ , ecuaciones 14 y 15, respectivamente. Sea  $U$  el número de espiras por cada capa y  $W$  el número de capas, tal que:

$$b = U \times d_E \Rightarrow U = \frac{b}{d_E} = \frac{2a}{3d_E}, \quad (14)$$

$$c = W \times d_E \Rightarrow W = \frac{c}{d_E} = \frac{2a}{3d_E}, \quad (15)$$

Por consiguiente, el número de espiras que pueden quedar alojadas dentro de la sección cuadrada, propia del arrollamiento, ecuación (16).

$$N = U \times W = \left(\frac{2a}{3d_E}\right) \times \left(\frac{2a}{3d_E}\right) = \frac{4a^2}{9d_E^2}, \quad (16)$$

Sustituyendo esta expresión del número de espiras en la ecuación 7, queda ecuación 17.

$$L = 1.68729 \times 10^{-9} \left(\frac{4a^2}{9d_E^2}\right)^2 a = 3.33292 \times 10^{-10} \frac{a^5}{d_E^4} \quad (17)$$

Resolviendo para el radio medio resulta, finalmente ecuación 18.

$$a = \left(\frac{L \times d_E^4}{3.33292 \times 10^{-10}}\right)^{1/5} \quad (18)$$

#### 4. Resultados

La prueba de un transformador de corriente para instrumentación a media tensión y frecuencias distintas a los 60 hertz de la red eléctrica de distribución requirió de un inductor especificado para 8.0 milihenrys a 10 amperes eficaces. En la tabla 1 se listan los valores obtenidos, conforme al procedimiento detallado en la sección previa. El aspecto de este inductor se muestra en la figura 8. Por su

parte, la figura 9 presenta la medición efectuada con el puente automático LCR y la figura 10 la comprobación con el método de los tres voltímetros [11].

Tabla 1 Resultados de los diseños tomados como ejemplo.

Parámetro de diseño	8.0 mH 10 A	1.4 mH 5 A
Sección transversal requerida (ecuación 8) $A_{Cu}$ [mm <sup>2</sup> ] ( $J = 4.0 \text{ A / mm}^2$ )	2.50	1.25
Diámetro del conductor desnudo (ec. 9) $d_D$ [mm]	1.7841	1.2616
Calibre estimado (ecuación 10) AWG [#]	13.21	16.20
Aproximación a calibre AWG [#]	12	16
Diámetro corregido, conductor desnudo (ecuación 11) $d_D$ [mm]	2.0525	1.2908
Diámetro del conductor esmaltado (ecuaciones 12 o 13) $d_E$ [mm]	2.0919 (doble)	1.3217 (simple)
Radio medio para el inductor (ecuación 18) $a$ [mm]	54.01	26.40
Lado de sección cuadrada (ecuaciones 5 y 6) $b$ y $c$ [mm]	36.01	17.60
Espiras por capa y número de capas (ecuaciones 14 y 15) $U$ y $W$ [#]	17.21 → 17	13.31 → 13
Número total de espiras $N$ [#]	296.28 → 289	177.29 → 169



Figura 8 Aspecto del inductor de 8.0 milihenrys a 10 amperes.



Figura 9 Medición en puente automático LCR; inductor 8.0 mH a 10 A.

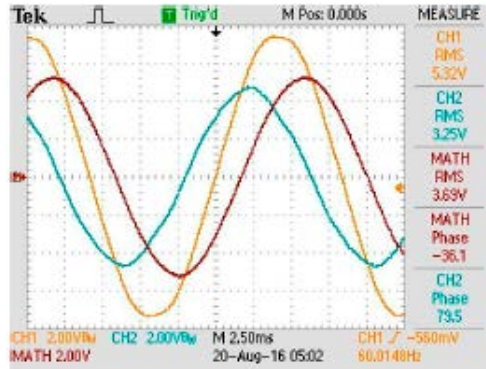


Figura 10 Medición con método de tres vóltmetros; inductor 8.0 mH a 10 A.

Para los efectos de comprobación de la consistencia de este método, se propuso el diseño de un inductor de 1.4 milihenrys a 5 amperes eficaces. La columna correspondiente de la tabla 1 lista los valores aplicables, conforme al método descrito. El inductor terminado aparece ilustrado en la figura 11, mientras que en la figura 12 se detalla la medición con el puente automático LCR y en la figura 13 con el método de los tres vóltmetros [11].

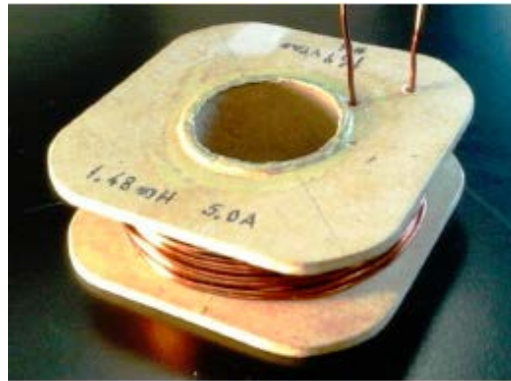


Figura 11 Aspecto del inductor de 1.4 milihenrys a 5 amperes.



Figura 12 Medición en puente automático LCR; inductor 1.4 mH a 5 A.

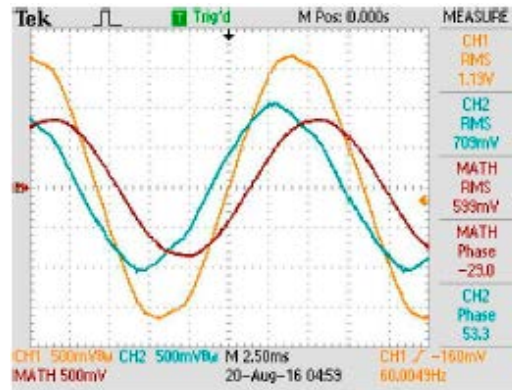


Figura 13 Medición con método de tres voltímetros; inductor 1.4 mH a 5 A.

## 5. Conclusiones

Atendiendo a la facilidad para su aplicación, así como a los resultados obtenidos, se estima que el método aquí descrito constituye una herramienta versátil para apoyar el trabajo de diseño de componentes inductivos. Aún cuando las desviaciones en los resultados no son significativas – inferiores al 5 %, lo cual destaca la confiabilidad del método – se estima que la dificultad para lograr con exactitud los parámetros geométricos, así como los del devanado, son los causantes de dichas desviaciones.

## 6. Referencias

- [1] R. Clarke, "An introduction to the air cored coil". <http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air-coils.html>.
- [2] H. Nagaoka, "The Inductance Coefficients of Solenoids". Journal of the College of Science, Imperial University. Volumen XXVI. Año 1909. Pp. 1-33.
- [3] H.A. Wheeler, "Simple Inductance Formulas for Radio Coils". Proceedings of the Institute of Radio Engineers. Volumen 16. No. 10. Agosto 2006. Pp. 1398-1400.
- [4] M.T. Thompson, PhD, "Inductance Calculation Techniques". <http://www.pci.com> <http://www.thompsonrd.com/induct2.pdf>
- [5] F.W. Grover. "Inductance Calculations: Working Formulas and Tables". Octubre 2009. Dover Publications. New York, USA.

- [6] "Multilayer Air Core Inductor Calculator. <http://www.pronine.ca/multind.htm>. Junio 2016.
- [7] H.B. Brooks. "Design of standards of inductance and the proposed use of model reactors in the design of air-core and iron-core reactors". Bureau of Standard Journal of Research. Research Paper 342 (RP342). Volumen 7. No. 2. 12 mayo 1931. Pp. 289-328.
- [8] Ness Engineering. Brooks Coil Formulas. Ness Engineering, Inc. <http://www.nessengr.com/techdata/brooks/brooks.html>. Junio 2016.
- [9] A. Estévez Tapia. "NOM-001 SEDE 2005 Instalaciones Eléctricas (utilización)". Primera edición. 2011. LIMUSA. México. Tabla 310-16. Pág. 146.
- [10] Condumex. "Tablas de Alambre Magneto". Sección Técnica. Conductores Mexicanos Eléctricos y de Telecomunicaciones, SA de CV <http://www.condumex.com.mx/ES/Alambre-magneto/>.
- [11] J.N. Reider Burstin. "Método para la medición de la inductancia bajo condiciones reales de operación". Pistas Educativas, XI Semana de Ingeniería Electrónica. ISSN: 1405-1249. Año XXXVI. Número 112. Noviembre 2015. 07-9 octubre 2015. Pp. 935-953.

## 7. Autor

M. en C. Jerry N. Reider Burstin, candidato a doctor en ingeniería por la Universidad Anáhuac – México Norte, obtuvo su título de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica en el *Technion* – Instituto Tecnológico de Israel en 1975. Además de la docencia en ingeniería, con enfoque primario hacia los temas relacionados con la electricidad y la electrónica desde hace ya casi 40 años, ha fungido como consultor para varias empresas del ramo.



# DISEÑO DE UN INVERSOR RESONANTE SERIE PUENTE COMPLETO PARA UNA SONOBOYA ACTIVA

***Ricardo Villalobos Mendoza***

Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM)  
*ricardovime@gmail.com*

***Miguel Alvarado Juárez***

Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM)  
*malvarado@semar.gob.mx*

***José Reyes Velázquez***

Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM)  
*inidetam@semar.gob.mx*

***Nimrod Vázquez Nava***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*n.vazquez@ieee.org*

## **Resumen**

Un dispositivo Inversor Resonante Serie Puente Completo fue desarrollado, en forma conjunta por el INIDETAM y el ITC, para optimizar el desempeño de una Sonoboya activa que integra el Sistema de Vigilancia Marítima por Sonar operado y controlado desde una Unidad de Superficie de la Armada de México. El presente trabajo de investigación se enfoca al desarrollo conjunto de un dispositivo de potencia para la Sonoboya Activa, se detalla el análisis, diseño e implementación del inversor resonante y se presentan resultados experimentales de un prototipo de 1kW. El dispositivo está formado por un inversor puente completo que convierte el voltaje CD/CA, y por un tanque resonante que es un circuito LC que provoca la Frecuencia de Resonancia del Inversor ( $f_s$ ) que se conecta en serie con el Transductor.

**Palabra(s) Clave(s):** Frecuencia de Resonancia, inversor resonante, piezoeléctrico, puente completo, SONAR, sonoboya activa.

## 1. Introducción

La propagación del sonido en el agua ha sido abordada con los propósitos de exploración y detección en los océanos. Estos usos contribuyen a que la ingeniería desarrolle Sistemas de Navegación y Determinación de distancias de blancos empleando el Sonido (SONAR, por sus siglas en inglés), los cuales tienen dos modos fundamentales de operación: Pasivo y Activo. El Pasivo escucha el sonido acústico subacuático irradiado por diversas fuentes y emplea el procesamiento de las señales para determinar su dirección; mientras que el Activo emite pulsos acústicos subacuáticos en la dirección, donde se encuentran las fuentes detectadas, para determinar la distancia [1, 2].

INIDETAM se encuentra desarrollando un Sistema de Vigilancia Marítima por Sonar que será operado y controlado desde un buque de Patrulla Oceánica. El proyecto es financiado por el Fondo Sectorial de Investigación en Ciencias Navales (FSIDCN) bajo la clave MARINA-2013-C11-207545. Comprende un sonar pasivo portátil, sonoboyas activas y pasivas para la detección de blancos por encima de la termoclina estacional, así como un SONAR de Profundidad Variable (VDS, por sus siglas en inglés) para la detección de blancos a profundidades mayores. El presente trabajo de investigación se enfoca al desarrollo conjunto de un dispositivo de potencia para la Sonoboya Activa, se detalla el análisis, diseño e implementación del inversor resonante y se presentan resultados experimentales de un prototipo de 1 kW. La instrumentación de estos desarrollos hizo necesaria la construcción del primer Laboratorio de Acústica Subacuática en México, en las instalaciones del INIDETAM, ver figura 1.

Los sensores desarrollados emplean material piezoeléctrico a base de Titanato Zircanato de Plomo (PZT, por sus siglas en inglés) como elemento sensible. Este material tiene la propiedad de generar un voltaje a la salida de sus terminales, cuando es afectado por ondas de presión. Esta es la operación en modo pasivo y al sensor se le denomina "Hidrófono". En el modo activo de operación, se suministra un voltaje a los electrodos del material PZT y éste emite un pulso acústico que está en función del impulso eléctrico aplicado. Cuando el sensor es capaz de recibir variaciones de presión y emitir voltajes en consecuencia, se le

denomina “Transductor”. Los medios de fabricación del material PZT varían en función de los modos principales de operación como en [3]. Es deseable que el rango dinámico de operación de los hidrófonos se encuentre alejado de sus frecuencias de resonancia, mientras que, los transductores se diseñan para operar lo más cercano a su frecuencia de resonancia fundamental.



Figura 1 Laboratorio de Acústica Subacuática en INIDETAM.

La frecuencia de resonancia del transductor ( $f_r$ ) presenta una impedancia mínima, donde se obtiene la máxima potencia, por lo que para eficientar el empleo de la Sonoboya activa, surgió la necesidad de contar con un Inversor Resonante Serie Puente Completo como en [4]. Se compone de un Inversor Puente Completo para convertir el voltaje CD/CA y por un tanque resonante, que es un circuito LC con el que controla la frecuencia de resonancia del inversor ( $f_s$ ). El tanque resonante está conectado en serie con el transductor. El inversor es capaz de entregar un voltaje de frecuencia variable con una forma de onda aproximadamente senoidal. Sin embargo, la impedancia mínima que presenta el

transductor sigue siendo relativamente alta para un circuito electrónico, por lo cual es necesario el empleo de un transformador que eleve la amplitud del voltaje.

## 2. Desarrollo

### Caracterización del Transductor

La respuesta en frecuencia del transductor es decisiva para optimizar el empleo de la Sonoboya activa y es el punto de partida para el diseño del Inversor Resonante Serie de Puente Completo, ya que es necesario conocer el comportamiento de la carga en un rango determinado de frecuencias, la cual está representada por el transductor construido por material piezoeléctrico. La figura 2 muestra un barrido de 20 Hz a 20 kHz, aplicado al transductor mediante un equipo Analizador de Impedancias, mostrando los siguientes valores: impedancia ( $Z_r = 700.88 \Omega$ ), frecuencia de resonancia ( $f_r = 13 \text{ kHz}$ ), fase ( $\theta_r = -32.77^\circ$ ) y el circuito eléctrico equivalente [5], donde: ( $C_0 = 5.3466 \text{ nF}$ ,  $R_1 = 770.775 \Omega$ ,  $C_1 = 1.0766 \text{ nF}$  y  $L_1 = 136.1816 \text{ mH}$ ).

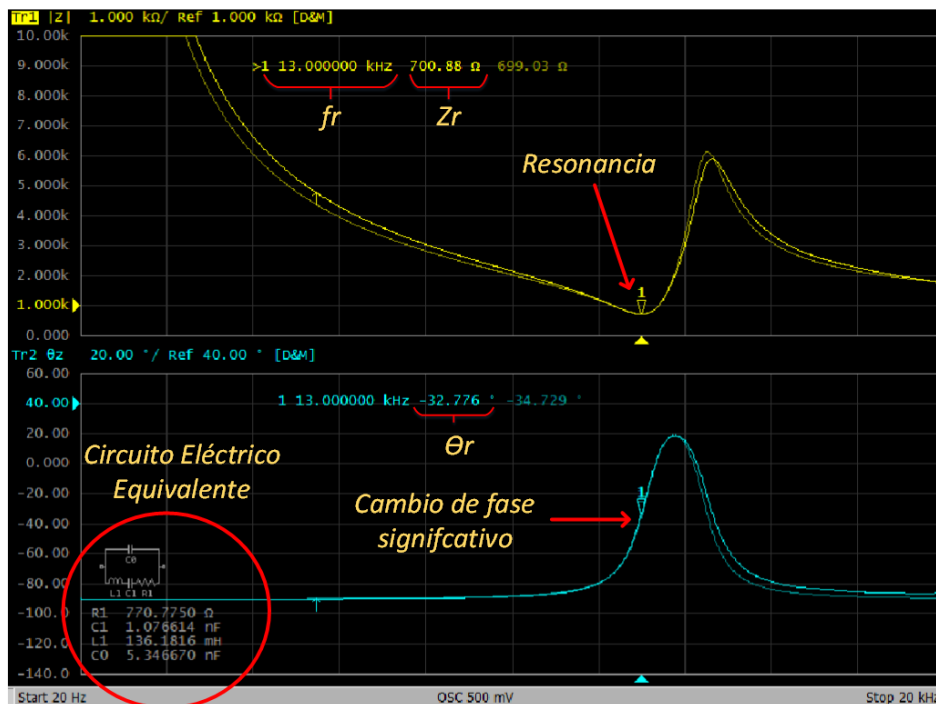


Figura 2 Caracterización de Transductor.

## Inversor Puente completo

La figura 3 muestra un inversor puente completo monofásico, el cual consiste en cuatro transistores bidireccionales activados por Conmutación por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés), como se muestra en [6, 7]. El PWM puede proporcionar un voltaje de salida bipolar o unipolar dependiendo de cómo sean activados los interruptores “Q1, Q2, Q3 y Q4” como en [8], ver figura 4.

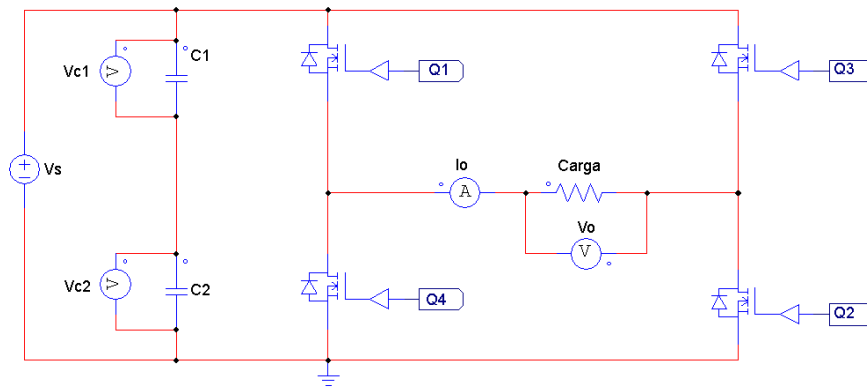


Figura 3 Inversor Puente Completo.

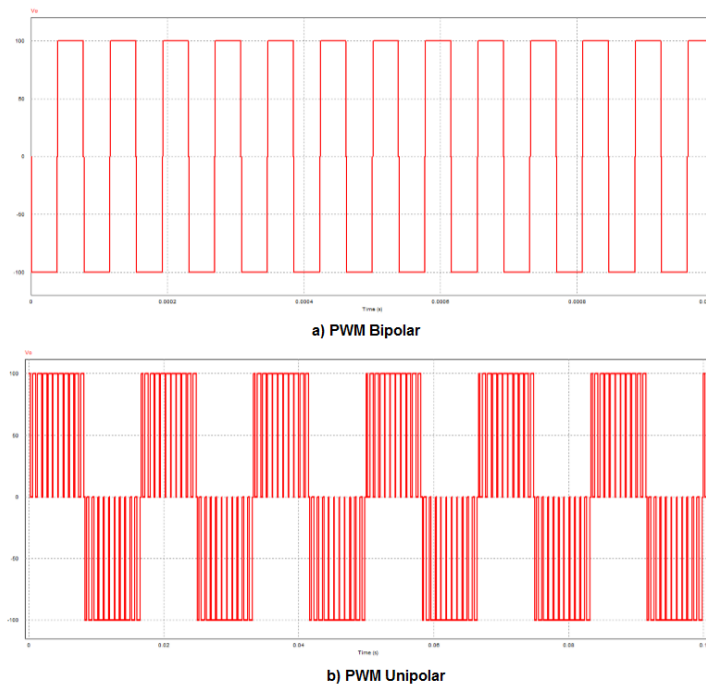


Figura 4 Formas de onda del voltaje de salida del inversor con PWM.

## Tanque Resonante

Está formado por un circuito Inductivo-Capacitivo (LC) como en [9], que se conecta en serie o paralelo con la carga. Sin embargo, por características descritas en [4] y los valores mostrados en la figura 2, donde se muestra una carga con alta impedancia, la configuración serie resulta ser la más adecuada para aplicaciones de alto voltaje y baja corriente, ver figura 5.

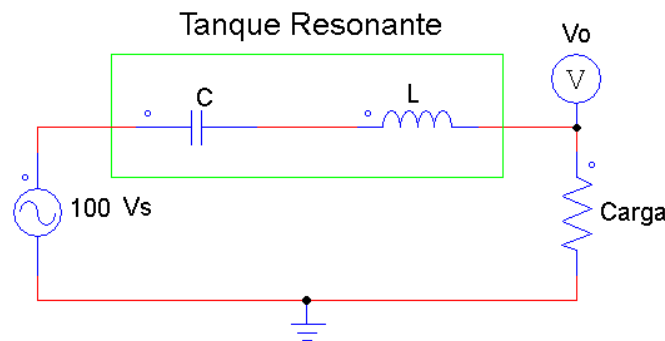


Figura 5 Tanque Resonante Serie.

Las principales características del tanque resonante están dadas por:

- Potencia eléctrica ( $P_L$ ), ecuación 1.

$$P_L = \frac{V_p^2}{2R} = \frac{4^2 V_s^2}{2R \pi^2} \quad (1)$$

- Frecuencia de resonancia ( $f_s$ ), ecuación 2.

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (2)$$

- Factor de calidad ( $Q_s$ ), ecuación 3

$$Q_s = \frac{2\pi f_s L}{R} \quad (3)$$

- Magnitud de la ganancia ( $G_s$ ), ecuación 4.

$$G_s = \left| \frac{V_o}{V_s} \right| = \frac{1}{[1 + Q_s^2 (u - \frac{1}{u})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$u = f_m / f_s$  Donde  $u$  es la relación de frecuencias y ( $f_m$ ) es la

frecuencia de conmutación o activación de los transistores.

- Ángulo de desfaseamiento ( $\theta_r$ ) de  $\frac{V_o}{V_s}$ , ecuación 6.

$$\theta_r = -\tan^{-1} \left[ Q_s \left( u - \frac{1}{u} \right) \right] \quad (5)$$

La figura 6 muestra la magnitud de la ganancia definida en (4), para valores del factor de calidad de 1 a 5. Se observa que para que el voltaje de salida sea continuo, la frecuencia de conmutación del inversor ( $f_m$ ) debe ser mayor que su frecuencia de resonancia ( $f_s$ ). La potencia máxima se presenta en la frecuencia de resonancia, con la magnitud de ganancia ( $G_s = 1$ ) y la relación de frecuencias ( $u = 1$ ).

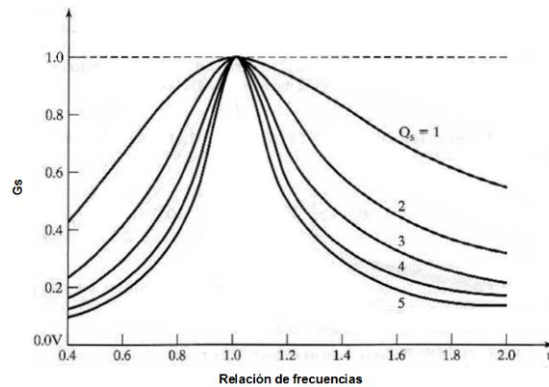


Figura 6 Respuesta en frecuencia del inversor resonante [4].

### Transformador

Es un dispositivo usado en gran medida para elevar o reducir los niveles de voltajes mediante la acción de un campo magnético. El transformador consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético, ver figura 7.

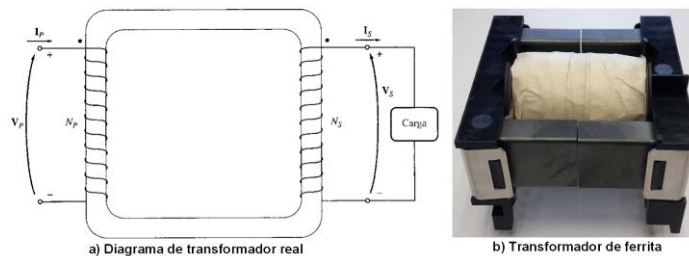


Figura 7 Diagrama y ejemplo de transformador [10].

Las principales características del transformador están dadas por:

- Relación de transformación ( $\alpha$ ), ecuación 6.

$$\alpha = \frac{N_{pri}}{N_{sec}} = \frac{V_{pri}}{V_{sec}} = \frac{I_{sec}}{I_{pri}} \quad (6)$$

- Impedancia del transformador referida al primario ( $Z_L$ ), ecuación 7.

$$Z_L = \frac{V_{pri}}{I_{pri}} \quad (7)$$

- Impedancia aparente transformador referida al primario ( $Z_L'$ ), ecuación 8.

$$Z_L' = \alpha^2 Z_L \quad (8)$$

- Potencia de salida ( $P_o$ ), ecuación 9.

$$P_o = V_o I_o \cos \theta \quad (9)$$

Donde  $\cos \theta$  es el ángulo de desfase de  $\frac{V_o}{I_o}$ .

- Voltaje del devanado secundario ( $V_{sec}$ ), ecuación 10.

$$V_{sec} = \sqrt{P_o R} \quad (10)$$

Donde  $R$  es la carga.

- Corriente del devanado secundario ( $I_{sec}$ ), ecuación 11.

$$I_{sec} = \frac{V_s}{R} \quad (11)$$

## Diseño del Inversor Resonante

Debido a que el dispositivo desarrollado para la Sonoboya activa emplea un inversor puente completo y un tanque resonante, citados anteriormente, se le llama Inversor Resonante Serie de Puente Completo, ver figura 8. El circuito LC provoca la frecuencia de resonancia del inversor ( $f_s$ ), donde el tanque resonante está conectado en serie con el transductor. El inversor es capaz de entregar un voltaje de frecuencia variable, con una forma de onda aproximadamente senoidal, tal como en [11, 12, 13], ver figura 9.

El inversor puente completo opera con una frecuencia de conmutación ( $f_m = 13 \text{ kHz}$ ), un PWM Bipolar, un ciclo de trabajo ( $D = 50\%$ ) y en tiempo muerto ( $td = 200 \text{ ns}$ ).



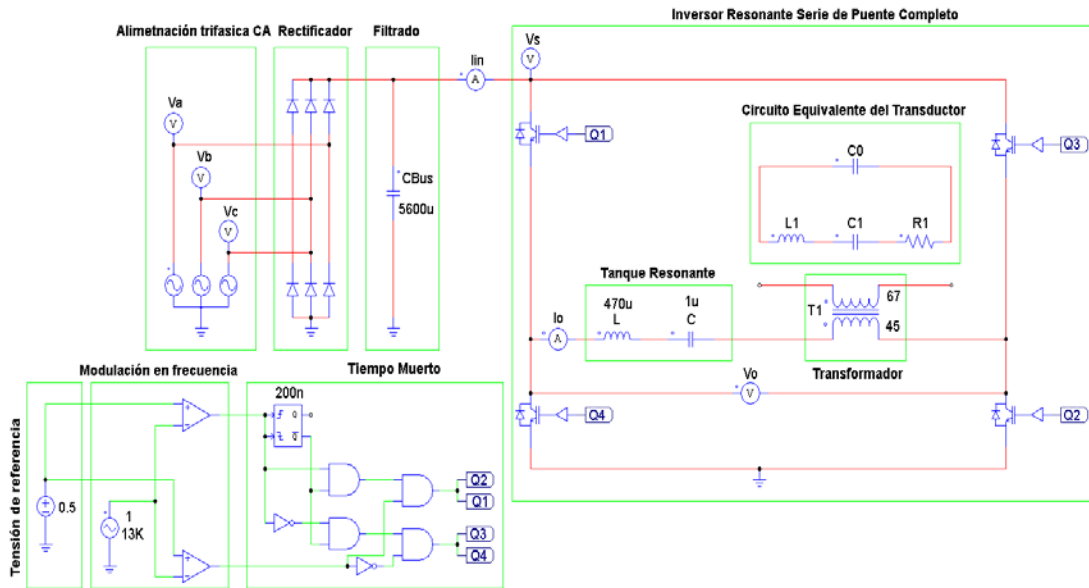


Figura 8 Inversor Resonante Serie de Puente Completo.

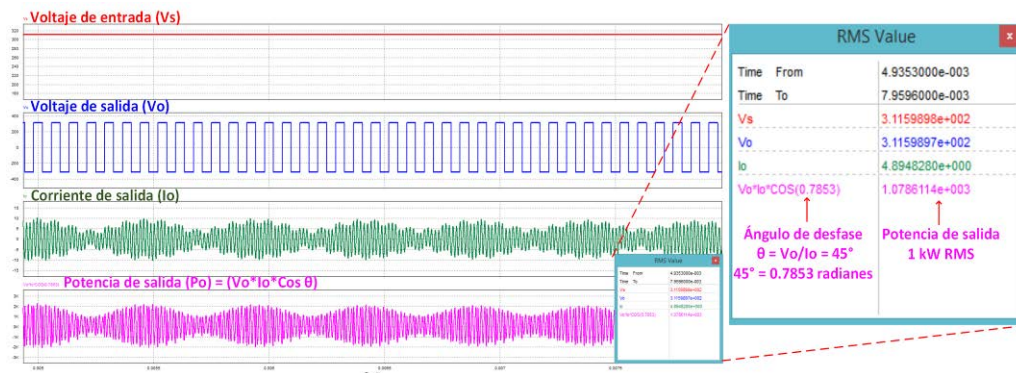


Figura 9 Formas de onda del Inversor Resonante a 1 kW.

El tanque resonante, se orientó a conseguir los siguientes valores:

$$f_r = 13 \text{ kHz} \qquad f_m = 13 \text{ kHz} \qquad f_s = 7 \text{ kHz}$$

$R = Z_r = (C0 = 5.3466 \text{ nF}, R1 = 770.775 \Omega, C1 = 1.0766 \text{ nF y } L1 = 136.1816 \text{ mH}) = 700.88 \Omega$  y  $Q_s = 0.02949$ . Se obtiene de (3) el Inductor  $L = 470 \mu\text{H}$  y de (2) el Capacitor  $C = 1 \mu\text{F}$ , con  $u = 1.85$ .

El diseño del transformador está en función del rango dinámico de operación del transductor de la Sonoboya activa, el cual consiste de un arreglo circular de cuatro proyectores con capacidad de emitir pulsos acústicos azimutales en los  $360^\circ$ , ver figura 10. Cuenta con un devanado primario y cuatro secundarios, con

las siguientes características:  $P_o = \frac{1kW}{4_{secundarios}} = 250 W$ ,  $V_s = 310 VCD$ . Para cada devanado secundario se calcula de (9), Voltaje del secundario  $V_{sbc} = 418 V$ ; con (10)  $I_{sbc} = 0.59 A$ ; con (6)  $N_{pri} = 45 vueltas$ ,  $N_{sbc} = 67 vueltas$  y  $a = 0.6716$ .

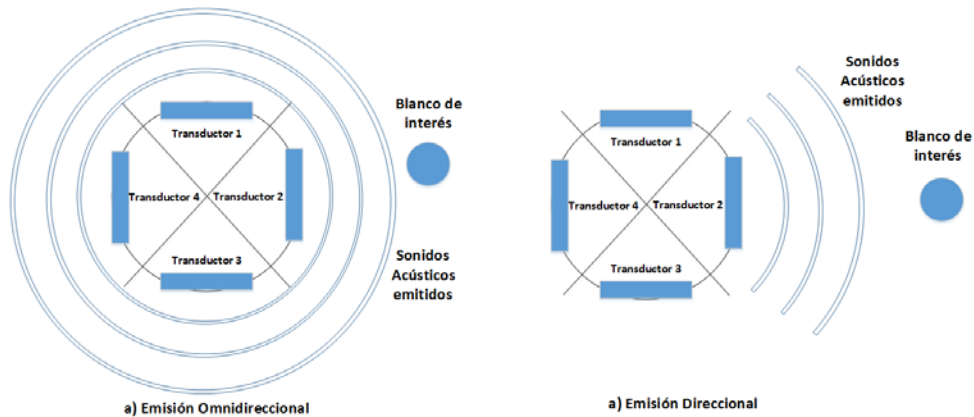


Figura 10 Arreglo de transductores para cubrir una resolución de 360°.

### 3. Resultados

La figura 11 muestra la implementación en Laboratorio del Inversor Resonante Serie Punte Completo para la Sonoboya activa. El voltaje principal de entrada al inversor ( $V_s = 310 VCD$ ). El control se realizó con una Tarjeta de Desarrollo NEXYS 4 DDR la cual contiene un Arreglo de Compuertas Programables en Campo (FPGA, por sus siglas en inglés). El PWM generado es Bipolar y con un Ciclo de Trabajo de 50%, a una frecuencia de conmutación ( $f_m = 12.6 kHz$ ), la cual se encuentra cercana a la frecuencia de resonancia del transductor (13 kHz), que es donde se obtiene la mayor potencia de salida. La frecuencia del tanque resonante es de 7 kHz, por lo que el inversor opera con una relación de frecuencias  $u = 1.85$ .

Las figuras 12, 13 y 14 muestran el comportamiento del voltaje de salida del inversor resonante y la corriente que demanda el transductor conectado como carga. La corriente del transductor presenta muchas oscilaciones debido a la naturaleza del material piezoeléctrico, ya que existen otras frecuencias de

resonancia que no son de interés. La potencia de salida ( $P_o$ ) se calcula con (9) con un ángulo de desfase  $\frac{V_o}{I_o}$  de  $\theta = 45^\circ$ .

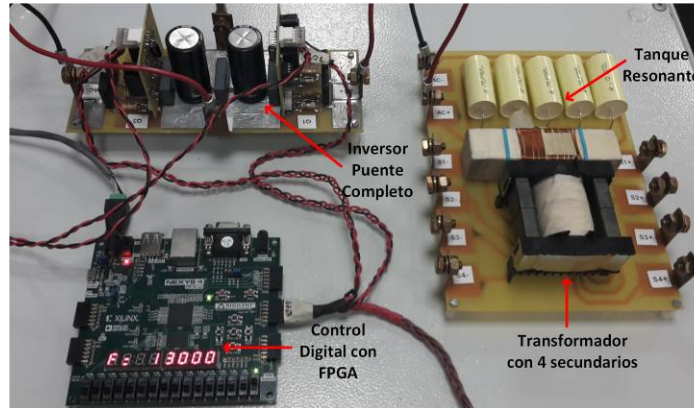


Figura 11 Implementación del Inversor Resonante Serie de Puente Completo.

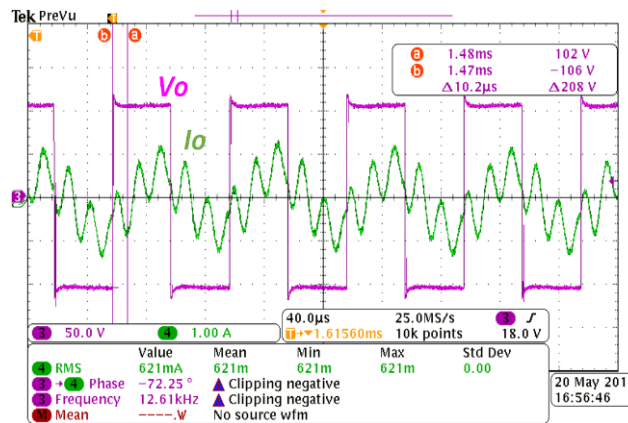


Figura 12 Formas de onda del Inversor Resonante con  $P_o = 46$  W.

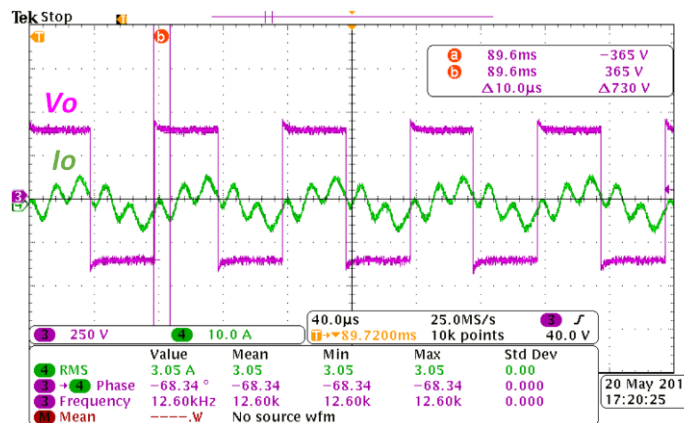


Figura 13 Formas de onda del Inversor Resonante con  $P_o = 787$  W.

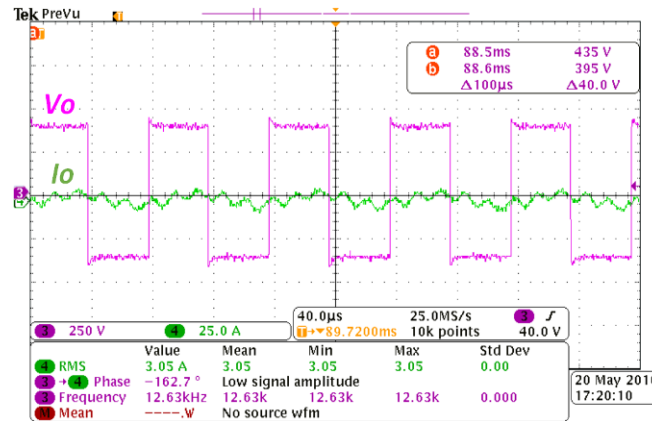


Figura 14 Formas de onda del Inversor Resonante con  $P_o = 938$  W.

## 5. Conclusiones

La sincronización de las frecuencias de resonancia, del transductor con el dispositivo electrónico inversor resonante desarrollado, optimiza el desempeño de la Sonoboya activa para emitir pulsos acústicos subacuáticos. La potencia máxima del inversor está en función de dos características, la primera es el voltaje de entrada, el cual se elevó mediante un transformador. La segunda, es la frecuencia del tanque resonante, la cual se ajustó para aproximarse a la frecuencia de resonancia del transductor, por lo que es imperativo conocer la respuesta en frecuencia en todo el rango dinámico de interés.

Las lecciones aprendidas resaltan la importancia de trabajar en bajo voltaje las pruebas preliminares de potencia del inversor e ir ajustando la frecuencia del tanque resonante para verificar que los elementos electrónicos y el control digital funcionen correctamente. Posteriormente, trabajar en alto voltaje hasta obtener la potencia de salida deseada.

La potencia máxima de salida obtenida en el dispositivo desarrollado fue de 938 Watts (ver figura 14), sin embargo, si se desea alcanzar una mayor distancia de propagación de las ondas subacuáticas debe aumentarse la potencia eléctrica, mediante el rediseño del transformador. Si se desea mejorar la resolución en el patrón de emisión debe incrementarse el número de transductores, con los consecuentes devanados secundarios del transformador.

El trabajo futuro en el desarrollo de éstos dispositivos debe estar orientado a la búsqueda de componentes electrónicos que aseguren un mayor ciclo de vida de trabajo, por lo que es altamente recomendable el desarrollo de una plataforma de pruebas que determine con precisión el tiempo medio entre fallas de cada uno de los componentes electrónicos utilizados.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] A. D. Waite, SONAR for Practising Engineers. Third Edition. 2005. Editorial John Wiley & Sons LTD. USA. Pp. 1-12.
- [2] Robert J. Urick, Principles of Underwater Sound for Engineers. First Edition. 1967. Editorial McGraw-Hill. USA. Pp. 66-90.
- [3] J. A. Cifuentes Gutiérrez, Baldosa Piezoeléctrica Para Alimentar Sistemas De Iluminación De Bajo Consumo Energético. 2013. Pp. 1-44.
- [4] M. H. Rashid, Electrónica de Potencia. Tercera Edición. 2004. Editorial Pearson Educación. México. Pp. 352-374, 630-636.
- [5] C. Kauczor, N. Frohlike, (2004). "Inverter topologies for ultrasonic piezoelectric transducers with high mechanical Q-factor". In Power Electronics Specialists Conference, PESC 04 IEEE 35th Annual. Vol. 4. 2004. Pp. 2736-2741.
- [6] G. S. Buja, M. P. Kazmierkowski, "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey". Industrial Electronics, IEEE Transactions on. Vol. 51. Issue 4. 2004. Pp. 744-757.
- [7] P. Gomes Barbosa, H. Antonio Carvarlho, M. do Carmo Barbosa, E. Coelho, "Boost current Multilevel Inverter and its Application on single-phase grid-connected photovoltaic systems" Vol. 21. No.4. July 2006. Pp. 1116-1124.
- [8] P. Khluabwannarat, C. Thammarat, S. Tadsuan, S. Bunjongjit, "An analysis of iron loss supplied by sinusoidal, square wave, bipolar PWM inverter and unipolar PWM invertir". In Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International. December 2007. Pp. 1185-1190.
- [9] S. Dieckerhoff, M. J. Ruan, R. W. De Doncker, "Design of an IGBT-based LCL-resonant inverter for high-frequency induction heating". In Industry

- Applications Conference. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE. Vol. 3. 1999. Pp. 2039-2045.
- [10] J. Stephen Chapman, Máquinas Eléctricas. Quinta Edición. 2012. Editorial McGraw-Hill. México. Pp. 1-90.
- [11] L. O. Burdio, J. M. Millan, I. Acero, D. Puyal, "Load-adaptive control algorithm of half-bridge series resonant inverter for domestic induction heating". IEEE transactions on industrial electronics. Vol. 56. Issue. 8. 2009. 3106-3116.
- [12] Y. S. Kwon, S. B. Yoo, D. S. Hyun, "Half-bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy". In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC'99. Fourteenth Annual. Vol. 1. March 1999. Pp. 575-581.
- [13] S. Okudaira, K. Matsuse, "New quasi-resonant inverter with short-circuit switches across the resonant capacitor and its operating characteristics". IEEJ Transactions on Industry Applications. Vol. 125. 2005. Pp. 793-799.

## 7. Autores

M. C. Ricardo Villalobos Mendoza obtuvo el título de Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica del Norte de Guanajuato en 2011, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya en 2013, actualmente es Desarrollador en el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM) y Jefe del Área de Electrónica del Proyecto Sistema de Vigilancia Marítima por Sonar (SIVISO) con clave MARINA-2013-C11-207545.

M. C. Miguel Alvarado Juárez obtuvo el título de Ingeniero en Ciencias Navales por la Heroica Escuela Naval Militar en 1995, el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Acústica Subacuática por la *Naval Postgraduate School*, EUA en 2003. Actualmente es el Director del Área de Sistemas de Armas en el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM) y Responsable Técnico del Proyecto Sistema de Vigilancia Marítima por Sonar (SIVISO) con clave MARINA-2013-C11-207545.

Ing. José Reyes Velázquez obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones Navales por la Escuela de Ingenieros de la Armada de México en 2012, actualmente es Desarrollador del Área de Electrónica del Proyecto Sistema de Vigilancia Marítima por Sonar (SIVISO) con clave MARINA-2013-C11-207545, en el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Armada de México (INIDETAM).

Dr. Nimrod Vazquez Nava obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Celaya en 1994, los grados de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica y Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el CENIDET en 1997 y 2003 respectivamente, actualmente es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya e investigador nivel 1 en el SNI.

# **DISEÑO DE UNA MICRO RED ELÉCTRICA INTELIGENTE CON SISTEMA FOTOVOLTAICO Y CELDA DE COMBUSTIBLE**

***Erika H. Rubio Cámara***

Centro de Investigación Científica de Yucatán  
*eri.hy.erc@hotmail.com*

***Luis C. Ordoñez López***

Centro de Investigación Científica de Yucatán

***Luis J. Ricalde Castellanos***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Emmanuel de la Cruz May***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*eri.hy.erc@hotmail.com*

***Ricardo J. Peón Escalante***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*eri.hy.erc@hotmail.com*

## **Resumen**

En este trabajo, se propone diseñar una microred eléctrica compuesta por sistemas de generación fotovoltaico, celda de combustible y una fuente de respaldo por supercapacitor integrados en un bus de DC (corriente directa). Las variables de radiación solar se caracterizarán con los datos experimentales de una estación meteorológica y la generación fotovoltaica y por celda de combustible es dimensionada de acuerdo a la demanda de energía del edificio de Mecatrónica en la Facultad de Ingeniería de la UADY (Universidad Autónoma de Yucatán). La base de conocimientos para predicción de la microred utiliza los



modelos matemáticos de los elementos de generación; las predicciones de generación de energía y demanda de carga se obtienen mediante redes neuronales que serán entrenadas con un algoritmo basado en el filtro de Kalman.

**Palabra(s) Clave(s):** gestión energética, red eléctrica inteligente, redes neuronales, sistema fotovoltaico, tecnología de hidrógeno.

## 1. Introducción

Actualmente vivimos una crisis de energía debido a la creciente demanda mundial, que se satisface principalmente con los combustibles derivados del petróleo; al generar energía con este tipo de combustible se emiten gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global, la alteración del clima y el hábitat.

Recientemente, los costos de producción y almacenamiento de diversas fuentes de energía renovables de baja capacidad han disminuido. En los últimos años el costo del kW instalado de energía fotovoltaica en mediana escala se ha reducido hasta un rango de 2000 a 4000 USD; siendo los más bajos, seguido de la energía eólica con un costo 3000 a 8000 USD por kW instalado [1]. Actualmente hay muchos trabajos para la integración de las energías renovables a redes eléctricas públicas como consecuencias de esta reducción de los costos [2], [3], [4]. Los primeros pasos en la integración de fuentes de energía renovable se dieron con la implementación de sistemas híbridos fotovoltaicos/eólicos como fuentes complementarias para aplicaciones rurales y conexiones débiles a la red, donde el nivel de voltaje no siempre se puede mantener constante [5]. Actualmente se realiza investigación en la integración de diversas fuentes de energía de pequeña escala tales como solar térmica, biomasa, celdas de combustible y mareomotriz en instalaciones menores a los 100 kW. Esta integración se realiza bajo nuevos y avanzados esquemas de control constituyendo lo que se denomina una red eléctrica inteligente.

La demanda de la red eléctrica inteligente en general no coincide en el tiempo con la generación de fuentes renovables, la red requiere de dispositivos de almacenamiento de energía. Con el desarrollo de tecnologías de hidrógeno, el

almacenamiento de la energía en forma de hidrógeno es una opción muy prometedora con menor impacto ambiental. El uso de estas tecnologías se ha incrementado a pesar que los costos actuales de los componentes (electrolizador, tanque de hidrógeno y celdas de combustible) son altos. Un esquema de almacenamiento por hidrógeno puede implementarse en el diseño de microredes para garantizar la sustentabilidad energética de un edificio.

Una microred eléctrica inteligente debe garantizar la sustentabilidad energética de una edificación principalmente a partir de la generación fotovoltaica. En las situaciones donde la generación de electricidad en el sistema fotovoltaico exceda la demanda del edificio, la energía excedente podría ser almacenada en forma de hidruros metálicos y emplear posteriormente una celda de combustible cuando la generación disminuya por debajo de la demanda. Tischer and Verbic [6] estudiaron un sistema de gestión de energía para una casa inteligente. Dicha casa fue equipada con una celda de combustible, la cual se utilizó para la cogeneración de potencia y almacenamiento térmico, un sistema fotovoltaico, un carro eléctrico y una unidad de almacenamiento de energía térmica. Ishida, [7], propuso un sistema que integra diversas fuentes de energía renovable y la red de distribución eléctrica convencional, con la intención de realizar una distribución inteligente basada en el intercambio de excesos y carencias de energía en un conjunto de hogares a partir de modelos de reproducción biológicos. Con el fin de predecir la generación de energía a partir de una serie de módulos fotovoltaicos, en [8] y [9], propusieron el uso de modelos matemáticos para caracterizar sistemas de generación que constan de módulos fotovoltaicos y circuitos eléctricos con diferentes topologías. En [10] se presenta el diseño de un sistema de generación escalable para aplicaciones de respaldo en sistemas no conectados a la red y con una potencia máxima de 50 kW con eficiencia superior al 50%. Este sistema integra un electrolizador, una celda de combustible, un sistema de almacenamiento de agua y otro para el almacenamiento de hidrógeno. El electrolizador opera con energía obtenida de un sistema fotovoltaico, eólico o directamente de la red.

Las redes neuronales artificiales se han aplicado de forma exitosa en problemas como el control de sistemas, clasificación de patrones, reconocimiento de patrones, predicción de series de tiempo y solución de problemas de optimización [11]. Las redes recurrentes están basadas en el modelo de Hopfield y son consideradas como buenas candidatas para aplicaciones de sistemas no lineales que tratan con incertidumbres y son atractivas debido a su fácil implementación, estructura relativamente simple, robustez y la capacidad de ajustar sus parámetros en línea [12]. Recientemente, se están aplicando las herramientas de inteligencia computacional en el campo de las energías renovables en problemas de: modelado dinámico, control y predicción. En [13] aplican las redes neuronales artificiales para estimar el ajuste dinámico de precios de energía eléctrica, generando un modelo de respuesta a la demanda de los consumidores a los cambios en precios. Utilizando un algoritmo de optimización se pueden identificar el ajuste dinámico de precios óptimo para inducir la respuesta deseada con respecto a una función objetivo predefinida y las restricciones dadas por los consumidores. El ajuste dinámico de precios y los métodos de predicción ayudan a una mejor gestión de los recursos energéticos y reducción de costos de electricidad.

En este trabajo, se modela matemáticamente las características de generación de potencia de una microred eléctrica compuesta de un arreglo de módulos fotovoltaicos y una celda de combustible conectados a un bus de corriente directa y un sistema de almacenamiento de hidrógeno. Además, se diseña un algoritmo basado en redes neuronales artificiales para aproximar a los valores reales la generación de potencia, y las curvas corriente-voltaje de los sistemas fotovoltaicos y producción de hidrógeno.

## **2. Desarrollo**

### **Sistemas Fotovoltaicos**

Los elementos que constituyen un sistema fotovoltaico son: módulo fotovoltaico, baterías, elementos de acondicionamiento de potencia, estructuras y accesorios. Un módulo fotovoltaico es un dispositivo diseñado para captar parte

de la radiación emitida por el sol y convertirla en energía eléctrica electricidad mediante el efecto fotovoltaico. Las celdas fotovoltaicas se pueden utilizar en conexión con la red eléctrica, o bien en sitios aislados, por medio de sistemas de almacenamiento.

Las características corriente-voltaje de una celda fotovoltaica se caracterizan por el modelo de diodo propuesto por ecuación 1, [14].

$$\begin{aligned}
 I_{PV} &= I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V_{PV} + I_{PV}R_s)}{AKT} \right) - 1 \right) - \frac{V_{PV} + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \\
 I_0 &= I_{or} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left( \frac{qE_G}{KA} \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right) \\
 I_{ph} &= (I_{scr} + k_i(T - T_r)) \frac{\lambda}{100}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde  $I_{PV}$  es la corriente de salida de la celda,  $I_{ph}$  es la corriente de luz,  $I_0$  es la corriente de saturación del diodo,  $I_{scr}$  es la corriente de corto circuito, A es el factor de idealización,  $E_G$  es el ancho de banda para el silicio, K es la constante de Boltzmann,  $k_i$  el coeficiente de temperatura de corto circuito a  $I_{scr}$ , q es la carga del electrón,  $R_s, R_{sh}$  son las resistencias en serie y shunt respectivamente. T es la temperatura de la celda fotovoltaica,  $T_r$  la temperatura de referencia,  $V_{PV}$  el voltaje de salida de la celda y  $\lambda$  la radiación. Se puede ver que la temperatura tiene un efecto negativo sobre el rendimiento del panel.

En este proyecto se trabajará con un arreglo fotovoltaico compuesto de módulos solar S60MC el cual utiliza 60 celdas solares monocristalinas con una potencia total de 250 W.

Para crear un modelo en simulación de una celda fotovoltaica se utilizan los datos ambientales radiación solar ( $W/m^2$ ) y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ). La figura 1 muestra las curvas típicas de irradiación para la ciudad de Mérida, de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la UADY para el año 2013; la tabla 1 muestra los valores promedio diarios de irradiación donde puede notarse que los meses de mayor potencial energético son marzo, abril, y mayo.

En la tabla 2 se enumeran los parámetros necesarios para implementar un modelo en simulación de un módulo fotovoltaico S60MC.

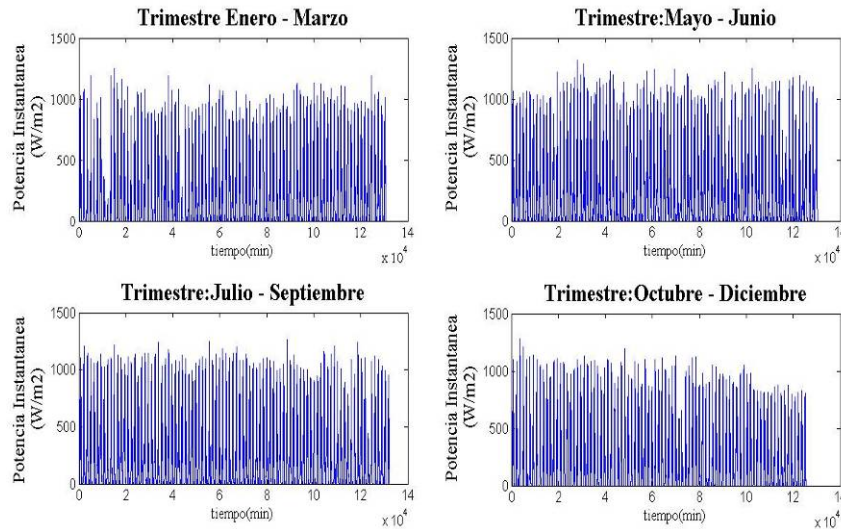


Figura 1 Curvas de irradiación diaria para la ciudad de Mérida (año 2013).

Tabla 1 Irradiación promedio diaria para la ciudad de Mérida (año 2013).

Mes	Irradiación promedio diario (kW*h/m²)
Enero	3.9147
Febrero	4.7759
Marzo	5.8352
Abril	6.1397
Mayo	5.7957
Junio	4.9753
Julio	5.4803
Agosto	5.7096
Septiembre	5.1945
Octubre	4.9861
Noviembre	4.5028
Diciembre	3.6928

Tabla 2 Parámetros de simulación para el módulo S60MC.

Parámetro	Valor para modelo S60MC
ISC	8.62 A
VOC	37.92 V
IMP	8.07 A
VMP	30.96 V
KV (m/°C)	-0.346%/°C
Ki (m/°C)	+0.036%/°C
Kp (m/°C)	-0.47%/°C
NC	60

### 3. Resultados

#### Dimensionamiento de la planta fotovoltaica en la red eléctrica inteligente

En esta sección se caracteriza la operación de los diferentes elementos que componen la micro red eléctrica. Se dimensionan la planta fotovoltaica, electrolizador y la celda de combustible a partir de los datos de predicción de potencial energético entregados por la red neuronal. Esto para hacer una propuesta de estructura de la microrred que, junto con una política de ahorro energético, pueda satisfacer la demanda; actualmente la instalación existente es insuficiente para este propósito. Posteriormente se integrarán las fuentes de energía y cargas al sistema de gestión energética para la optimización de su funcionamiento.

Para caracterizar la producción fotovoltaica consideramos inicialmente el potencial energético solar descrito en la Sección 2, el cual fue tomado a partir de mediciones durante un año. Se tiene entonces una insolación para la región de 5.0698, ecuación 2.

$$I_d = 5.0698 \frac{kWh}{m^2 \text{ dia}} \quad (2)$$

La demanda del edificio de Energías Renovables de la Facultad de Ingeniería de la UADY se estimará a partir de mediciones reales tomadas durante el mes de mayor consumo energético. La figura 2 muestra el perfil de demanda para el mes de mayo (se eliminó el día inhábil de la serie de tiempo con fines de consistencia).

A partir de las mediciones del mes de mayor consumo energético se puede obtener una estimación la carga energética mensual, ecuaciones 3 y 4.

$$E_{carga} = \left( \int P(t) dt \right) \left( \frac{1h}{12muestras} \right) \quad (3)$$

$$E_{carga} = 6,190 \text{ kWh /mes} \quad (4)$$

Para poder satisfacer esta demanda es necesario una instalación fotovoltaica capaz de generar 206.32 kWh diariamente. Al considerar la insolación promedio de  $5.0698 \frac{kWh}{m^2 \text{ dia}}$  se puede calcular la potencia fotovoltaica instalada con paneles

de 250 W de potencia, eficiencia de 15.9 % y un área de 1.63 m<sup>2</sup> como en las ecuaciones 5 y 6.

$$Pot_{PV} = \left( 5.0698 \frac{kWh}{m^2 \text{ día}} \right) (1.63 m^2) (0.153) \quad (5)$$

$$Pot_{PV} = 1.2644 \frac{kWh}{\text{día panel}} \quad (6)$$

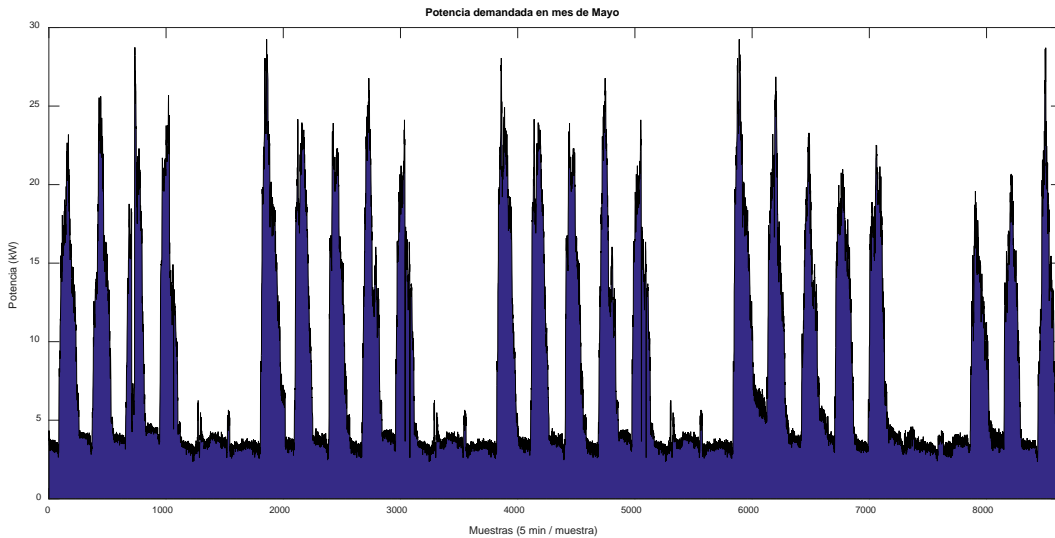


Figura 2 Potencia de la carga para mayo con muestras cada 5 minutos.

De donde el número de módulos fotovoltaicos necesarios en la instalación fotovoltaica está dado por las ecuaciones 7 y 8.

$$\#módulos = \frac{Potencia_{carga}}{Pot_{PV}} \quad (7)$$

$$= \frac{206.32 \frac{kWh}{\text{día}}}{1.2644 \frac{kWh}{\text{día panel}}} = 163.17 \text{ módulos} \quad (8)$$

Se requiere entonces una capacidad instalada de 40 kW de generación fotovoltaica para satisfacer la demanda energética.

Sin embargo, en la práctica, los sistemas fotovoltaicos son muy sensibles a los incrementos de temperatura lo cual deriva en una pérdida de eficiencia. Para estimar la pérdida de eficiencia en condiciones reales se tomaron mediciones de

la generación de potencia en una planta fotovoltaica de 4 kW la cual es monitoreada en intervalos de 5 minutos.

En condiciones normales de operación, bajo una insolación de  $6.1397 \text{ kWh}/\text{m}^2$  correspondiente al mes de abril (figura 3), la planta fotovoltaica debería producir 1286.19 kWh, ecuaciones 9 y 10.

$$E_{PV} = \left(6.1397 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{ dia}}\right) \left(1.63 \frac{\text{m}^2}{\text{módulo}}\right) (0.153)(28 \text{ módulos})(30 \text{ dias}) \quad (9)$$

$$E_{PV} = 1286.19 \text{ kWh} \quad (10)$$

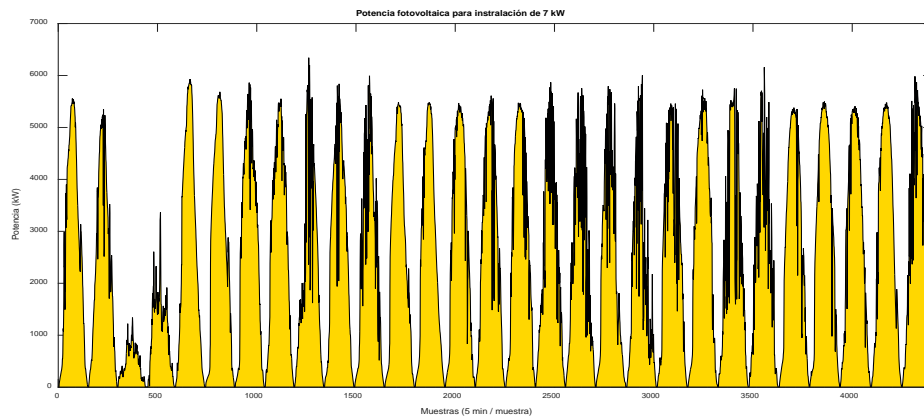


Figura 3 Potencia fotovoltaica generada para mes de abril en una instalación de 7 kW.

A partir del análisis de los datos medidos de la instalación de 7 kW , se tiene que se generaron en los 30 días de abril, 939.82 kWh . Los efectos de temperatura producen en este caso una caída en la producción de un 27% a pesar de ser el mes de mayor potencial solar. En general los paneles poseen un coeficiente de pérdida de eficiencia de  $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ . Durante los meses de mayor radiación y sensación térmica, los módulos fotovoltaicos pueden alcanzar hasta los  $70^{\circ}\text{C}$  derivando en una pérdida de eficiencia de alrededor del 20%.

Para comparar el fenómeno de pérdida de eficiencia en los módulos fotovoltaicos entre meses alta y baja radiación, se analizó una muestra de la potencia generada por la instalación de 7 kW en el mes de febrero (figura 4). La irradiancia promedio diaria es de  $4.509 \text{ kWh}/\text{m}^2$  y la generación fotovoltaica promedio diaria



es de 28.15 kWh. La generación fotovoltaica diaria teórica para estas condiciones es de 31.48 kWh, ver ecuaciones 11 y 12.

$$E_{PV} = \left(4.509 \frac{kWh}{m^2 \text{ dia}}\right) \left(1.63 \frac{m^2}{\text{módulo}}\right) (0.153) (28 \text{ módulos}) \quad (11)$$

$$E_{PV} = 31.48 \text{ kWh} \quad (12)$$

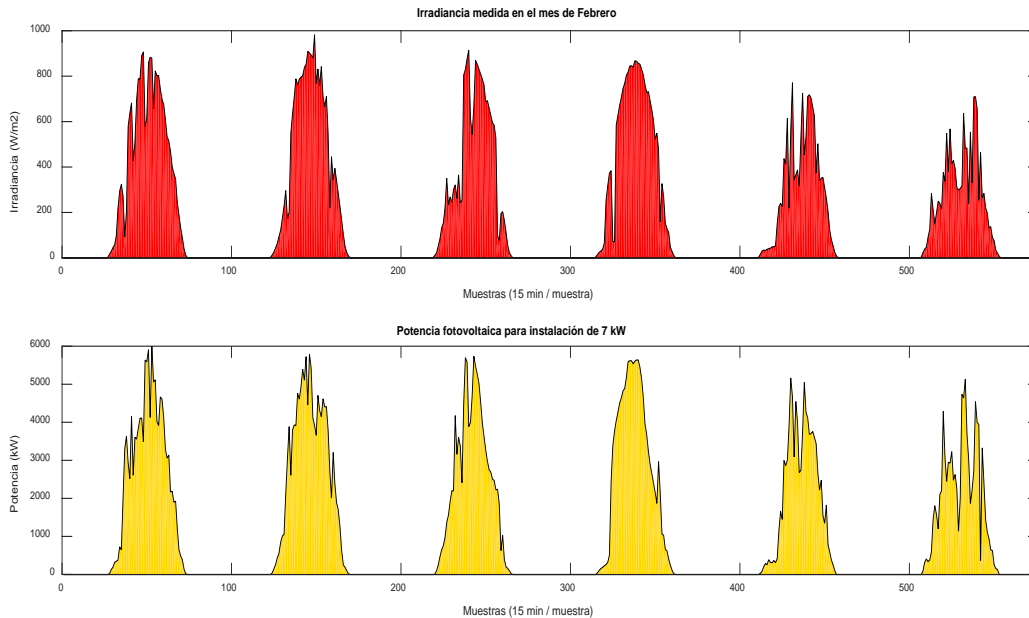


Figura 4 Potencia fotovoltaica generada para mes de febrero en una instalación de 4 kW.

En este caso se tiene una pérdida de generación del 10 %, de donde es evidente la influencia de las condiciones climatológicas en la eficiencia de la instalación fotovoltaica. A partir de estas mediciones puede concluirse que a pesar de que los meses de diciembre a febrero son considerados de baja radiación, la disminución en la generación de energía no es tan significativa como la que se presenta en los meses de mayor irradiancia.

Finalmente, para poder satisfacer la demanda energética tomando en cuenta las posibles pérdidas por calentamiento se propone incrementar en un 10% la capacidad instalada, siendo el diseño final de la generación fotovoltaica de 44 kW, el doble de la instalación existente actualmente. Se requiere para esto, 176 módulos de 250 W, los cuales se pueden conectar a 4 inversores Fronius de 11.4 kW.

Es posible estimar la producción de Hidrógeno por parte del electrolizador a partir de la predicción de generación fotovoltaica de la red neuronal. Para este proyecto se propone utilizar el modelo presentado en [15] para un electrolizador de 26 kW. 7 bar y el cual opera en un intervalo de 30-40 V, lo cual es adecuado para aplicaciones fotovoltaicas. Un modelo comercial con características similares es el McLyzer-8 bar de 31 kW. el cual es capaz de producir 6 Nm<sup>3</sup>/h.

Para la estimación de la cantidad de Hidrógeno generado se utiliza la predicción de la red neuronal de la generación de potencia por parte de la planta fotovoltaica. La figura 5 muestra el diagrama en Simulink para la predicción de producción de hidrógeno por el electrolizador.

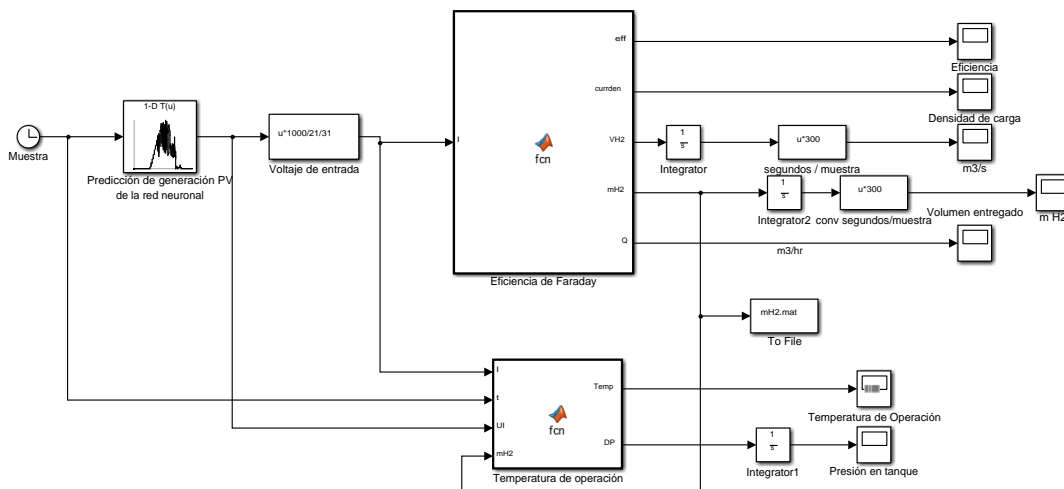


Figura 5 Modelo en Simulink de electrolizador de 26 kW.

Para caracterizar la operación del electrolizador consideraremos la producción fotovoltaica de un día típico junto con una curva de demanda alta. En los periodos donde la generación fotovoltaica sea mayor que la demanda, la potencia excedente será entregada al electrolizador para la producción de hidrógeno. En los periodos en los que la demanda exceda la generación fotovoltaica o está no esté disponible, se tomará la energía de la celda de combustible. En el caso en que la potencia entregada por la celda de combustible no sea suficiente para satisfacer la demanda, se tomarán acciones por parte del sistema de gestión para reducir la demanda.

Para la predicción de generación fotovoltaica, seleccionamos 8 regresores que se incluyen en el vector de entrada de la red neuronal para la medición de la serie de tiempo de la salida de potencia de la instalación. Se seleccionaron 20 neuronas en la capa oculta, 1 neurona de salida, 200 iteraciones máximo, los valores iniciales para pesos sinápticos aleatorios y un error como medida de desempeño de  $1 \times 10^{-4}$ . Los datos son normalizados antes de ser procesados por la red y la salida de la red es escalada para obtener los valores reales.

Para la predicción de demanda energética, seleccionamos 8 regresores, 20 neuronas en la capa oculta, 1 neurona de salida, 150 iteraciones máximo, los valores iniciales para pesos sinápticos aleatorios y un error como medida de desempeño de  $1 \times 10^{-4}$ .

#### 4. Discusión de resultados

La figura 6 muestra que la predicción de producción de energía fotovoltaica se realiza con éxito con un buen horizonte de predicción y un error cuadrático medio  $E=0.00078$ .

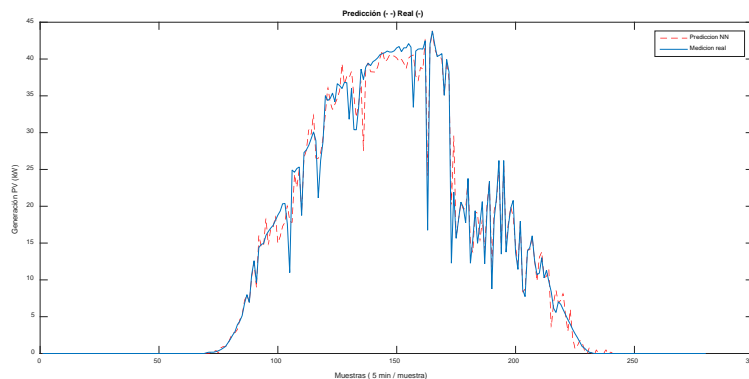


Figura 6 Predicción de la generación fotovoltaica.

La figura 7 muestra que la predicción de la demanda energética se realiza con éxito con un buen horizonte de predicción y un error cuadrático medio  $E=0.00012$ .

De la figura 7 se puede apreciar que la generación del sistema fotovoltaico excede la demanda en un periodo de 6 horas aproximadamente, entregando

energía al electrolizador de 104.75 kWh. Durante el resto del tiempo, la demanda excede a la generación en 56.34 kWh.

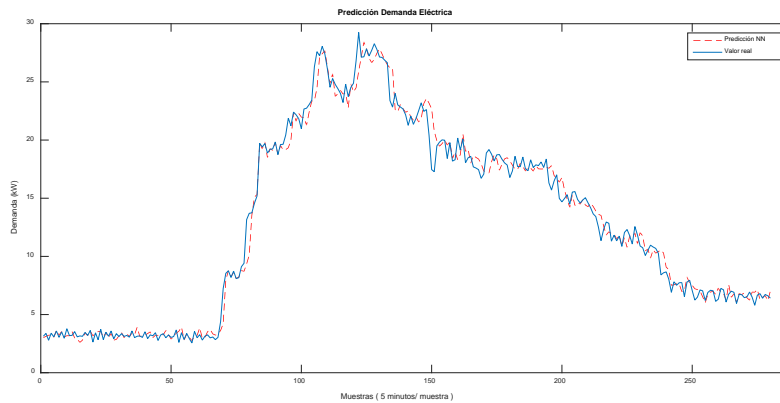


Figura 7 Predicción de la demanda energética.

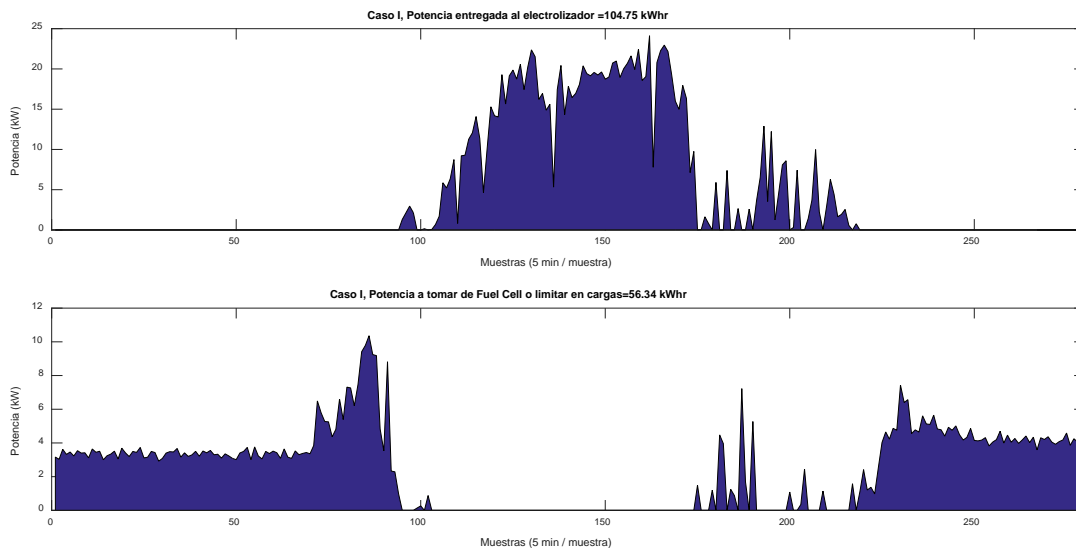


Figura 8 Potencias entregada al electrolizador y a demandar de la celda de combustible.

El excedente de energía es almacenado en forma de hidrógeno (eficiencia del 75% del electrolizador) y será utilizada por la celda de combustible (eficiencia del 40%) cuando la instalación fotovoltaica deje satisfacer la demanda. A partir de este esquema, se requiere ahorrar limitando cargas, 24.9 kWh. Cuando el balance de energía en la predicción sea negativo, se pueden eliminar las cargas ordinarias (aire acondicionado, iluminación) para garantizar la autonomía energética.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se utilizan herramientas de inteligencia computacional para mejorar la operación de una red eléctrica inteligente. En particular se aplican redes neuronales artificiales para la predicción de la generación de potencia de instalaciones fotovoltaicas, demanda de edificios, utilizando redes neuronales recurrentes de alto orden.

La microred eléctrica inteligente, diseñada para trabajar en un bus de DC, está compuesta de las siguientes cargas principales: Sistema de generación fotovoltaica de 44 kW, Electrolizador alcalino de 26 kW ,7 bar y Celda de combustible de 7.5 kW a 24 VDC. Como condición de almacenamiento en el tanque de hidrógeno se especifica que al menos existan almacenados 0.1 kg de H<sub>2</sub>.

Entre las principales aportaciones de este trabajo es el diseño de un modelo basado en redes neuronales para estimar la generación de potencia de un arreglo de paneles fotovoltaicos a partir de las condiciones ambientales y de irradiación. El error de aproximación de la red neuronal satisface los criterios de diseño y asegura una excelente aproximación con respecto a una base de datos obtenida de manera experimental.

Utilizando la predicción de la serie de tiempo de la generación de potencia del sistema fotovoltaico y la predicción de la demanda energética, se estimó la generación de hidrógeno mediante un electrolizador alcalino utilizando un modelo en simulación a partir del modelo matemático desarrollado en esta tesis. El modelo en simulación del sistema fotovoltaico-electrolizador mostró resultados similares a los reportados en la literatura. La principal ventaja del esquema presentado en esta tesis es el disponer de una herramienta confiable para el pronóstico de la producción energética y la correspondiente producción de hidrógeno utilizando las redes neuronales artificiales.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] NREL, Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs. [http://www.nrel.gov/analysis/tech\\_lcoe\\_re\\_cost\\_est.html#biblio](http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html#biblio). 2016.

- [2] Y. Hidaka, y K. Kawahara “Modeling of a hybrid system of photovoltaic and fuel cell for operational strategy in residential use”, 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). London. 2012.
- [3] M. Osswald, “Experience with zero emission hybrid systems solar, wind, batteries and fuel cells for off-grid base stations”. Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC), Proceedings of 2013 35th International. 2013. Pp. 1-5.
- [4] C. Nayar, S. Philips, “Novel wind/diesel/battery hybrid energy system”; Solar Energy Elsevier Science Ltd. Vol. 51. No. 1. 1993. Pp 65-78.
- [5] L. Ricalde, J. G. Catzin, A. Alanis, E. Sanchez, Time Series Forecasting via a Higher Order Neural Network trained with the Extended Kalman Filter for Smart Grid Applications, Artificial Higher Order Neural Networks for Modeling and Simulation. 2014. M. Zhang (Ed). IGI Global. Pp. 254-274
- [6] T. Henning, V. Gregor, “Towards a smart home energy management system - A dynamic programming approach”. Senior Member, IEEE. 2011.
- [7] T. Ishida, “Self-organization model for the energy cluster formation with distributed energy network”. IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG). 2013.
- [8] B. Marion, M. Anderberg, “PVWATTS -- An Online Performance Calculator for Grid-Connected PV Systems”. Proceedings SES Solar 2000 Conference, Madison, WI. 2000.
- [9] D. King, S. Gonzalez, G. Galbraith, W. Boyson, “Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters”. SAND2007-5036. Sandia National Laboratories. 2007.
- [10] M. Osswald, “Experience with zero emission hybrid systems solar, wind, batteries and fuel cells for off-grid base stations”. Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC), Proceedings of 2013 35th International. 2013. Pp. 1-5.
- [11] A. Alanís, L. Ricalde y E. N. Sánchez “High Order Neural Networks for Wind Speed Time Series Prediction”. Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, Georgia, USA. 2009. Pp. 76-80.

- [12] L. Ricalde, Inverse Optimal Adaptive Recurrent Neural Control with Constrained. 2005. Tesis de doctorado, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) Unidad Guadalajara. Guadalajara, México.
- [13] T. Holtschneider, I. Erlich, "Optimization of Electricity Pricing Considering Neural Network based Model of Consumers Demand Response". IEEE Computational Intelligence Applications in Smart Grid (CIASG). 2013. Pp. 154-160.
- [14] S. Rahman, K. Tam, "A feasibility study of photovoltaic-fuel cell hybrid energy system". Electrical Engineering Department Virginia Tech, Blacksburg. VA 24061. USA, IEEE Transactions on Energy Conversion. Vol. 3. No. 1. 1988.
- [15] L. Cao, "Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series". Physica D: Nonlinear Phenomena. Vol. 110. No. 1. 1997. Pp. 43-50.

## **7. Autores**

Ing. Erika H. Rubio Cámara recibió el título de Ingeniero Mecánico, del Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán, México, en 2012. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias en Energías Renovables del Centro de Investigación Científica de Yucatán. Fue profesora del programa de Ingeniería Mecatrónica del Centro de Estudios Superiores Francisco de Montejo, en 2013 y 2014, en Valladolid, Yucatán.

Dr. Luis C. Ordoñez López recibió el título de Ingeniero Químico de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en 1998, la Maestría en la Facultad de Química, UNAM y el doctorado en el Centro de Investigación en Energía, UNAM, en 2006. Actualmente es Investigador Asociado C de la Unidad de Energía Renovable en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Sus líneas de investigación son: desarrollo de nuevos materiales electrocatalíticos para celdas de combustible de alcohol directo, electrólisis en sistemas de membrana de intercambio iónico y oxidación electroquímica de compuestos

no biodegradables. Ha publicado varios artículos científicos y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI-1).

Dr. Luis J. Ricalde Castellanos recibió el título de Ingeniero Mecánico del Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán, México en 1999, la Maestría en Control Automático y el doctorado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-IPN (Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional), Guadalajara, México, en 2001 y 2005. Desde 2007, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como profesor investigador del programa de posgrado en Ingeniería opción Energías Renovables. Su interés de investigación es el control neuronal no lineal, las redes eléctricas inteligentes, sistemas de generación de energía fotovoltaica y eólica. Se le concedió el Premio del Arturo Rosenblueth en 2005 y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI-1).

Emmanuel de la Cruz May, obtuvo el título de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad del Valle de México, Campus Mérida en 2013. Actualmente está finalizando sus estudios de posgrado en Energías Renovables en la Facultad de Ingeniería de la UADY. Sus áreas de interés son la instrumentación electrónica y las redes eléctricas inteligentes.

M. I. Ricardo J. Peón Escalante obtuvo su grado de Maestro en Ingeniería Mecánica especialidad en diseño mecánico por la Universidad Nacional Autónoma de México y su área de investigación es síntesis óptima de sistemas mecánicos. Desde 2006, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como profesor del programa de Ingeniería Mecatrónica.



# **SIMULACIÓN “HARDWARE IN THE LOOP” DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES DE IMÁN PERMANENTE**

***Felix Quirino Morales***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*felix.quirino@alumno.buap.mx*

***Gerardo Mino Aguilar***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*felix.quirino@alumno.buap.mx*

***Beatriz E. Graniel García***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*felix.quirino@alumno.buap.mx*

***Edgar Peralta Sánchez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*felix.quirino@alumno.buap.mx*

***J. Fermi Guerrero Castellanos***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

*felix.quirino@alumno.buap.mx*

## **Resumen**

Este trabajo presenta el diseño, integración y puesta en marcha, de un sistema de ‘hardware in the loop’ para probar el control de velocidad de motores de imán permanente aplicados a tracción eléctrica. El sistema hardware in the loop (HIL) propuesto simula la carga mecánica que representa la dinámica de un auto eléctrico, así como el sistema de alimentación principal y los accionamientos eléctricos para controlar los dos motores que forman el sistema de tracción. Por otra parte, el algoritmo de control por campo orientado se programa en el sistema

de control industrial CompactRIO. Los resultados obtenidos validan la operación adecuada del control.

**Palabra(s) Clave(s):** Auto eléctrico, control de campo orientado, electrónica de potencia, hardware in the loop.

## 1. Introducción

Debido a problemas ambientales y energéticos, los vehículos eléctricos han retomado fuerza como una alternativa en lugar de los vehículos basados en motores de combustión interna. Una consecuencia del desarrollo de vehículos eléctricos es la variedad de topologías que el tren de potencia puede adoptar, una visión general de estas topologías se presenta en [1]. Sin embargo, además de las atractivas características ambientales de no contaminar en el sitio de uso del vehículo, todavía se deben alcanzar logros competitivos en términos de autonomía y costo. Para lograr estos objetivos, un extenso trabajo se debe hacer tanto en el desarrollo como en la prueba de sistemas electroquímicos (celdas de combustible, baterías y supercapacitores), controladores electrónicos, electrónica de potencia y control; el reto más grande es el de diseñar y dimensionar el tren de potencia a utilizarse en el vehículo tal y como se menciona en [2]. El diseño de algunos de estos subsistemas podría beneficiarse de las herramientas adecuadas para reducir los costos de desarrollo, esta cuestión es especialmente relevante, por ejemplo, durante el diseño de la etapa de electrónica de potencia como la que se presenta en este trabajo para controlar los motores de tracción. Estas herramientas de diseño pueden clasificarse en tres grupos: simulación numérica pura, plataformas de sistemas reales y sistemas de simulación basados en hardware-in-the-loop (HIL).

La simulación pura es el enfoque en el que los modelos y las simulaciones que se llevan a cabo son una mera aproximación del sistema real, la exactitud de las conclusiones se basa en gran medida en la exactitud y validez de los modelos numéricos usados en la simulación. Por otra parte, con el sistema real la validación que se obtiene es definitiva, según se observa en [3]. Sin embargo, este enfoque presenta algunas desventajas que no pueden ser ignoradas, tales

como los altos costos de los elementos sometidos a pruebas que algunas veces son destructivas, los requisitos de infraestructura y de seguridad, y la complejidad asociada a la realización de pruebas cuando un número elevado de elementos se ven involucrados.

Una solución intermedia entre los dos enfoques anteriores es la simulación de hardware-in-the-loop (HIL), en el que uno o varios dispositivos del sistema real son reemplazados por hardware electrónico en lugar de sus modelos simulados. Dependiendo de la naturaleza de las variables que interactúan entre los elementos simulados y físicos, la simulación HIL puede clasificarse como a nivel de señal, nivel de potencia o nivel mecánico como es descrito por Bouscayrol [4]. Los niveles de potencia y mecánico son utilizados para la simulación de sistemas de energía híbridos en vehículos eléctricos, ya que los dispositivos involucrados son elementos de potencia, siendo estos baterías, celdas de combustible, supercapacitores, convertidores de potencia y máquinas eléctricas.

En el banco de pruebas desarrollado en este trabajo, la dinámica del auto, las máquinas de imanes permanentes y convertidores de potencia utilizados en el sistema de tracción eléctrica (STE), se simulan mediante hardware-in-the-loop tal y como se muestra en [5, 6], mientras que el algoritmo de control para los motores eléctricos se realiza en un sistema de procesamiento digital como el utilizado por Poon [7].

En base a los trabajos desarrollados por Zhu [8] y Jeschke [9] es posible desarrollar la simulación HIL de un vehículo eléctrico para la evaluación tanto del comportamiento del vehículo ante diferentes escenarios o bien para observar el comportamiento de los diferentes sistemas eléctricos de potencia involucrados en la simulación del auto.

## **2. Desarrollo**

El banco de pruebas diseñado se divide en dos partes; la primera es la etapa de la simulación HIL que en este caso se compone por los dos accionamientos eléctricos y el módulo de baterías, estos componentes conforman el Sistema de Tracción Eléctrica (STE) del auto, además de estos bloques el sistema HIL

incluye la dinámica del auto. La segunda etapa del banco de prueba está conformada por una etapa de acondicionamiento de señal que se encarga de interconectar el sistema de control con la simulación HIL, el sistema de control se basa en CompactRIO como se muestra en la figura 1.

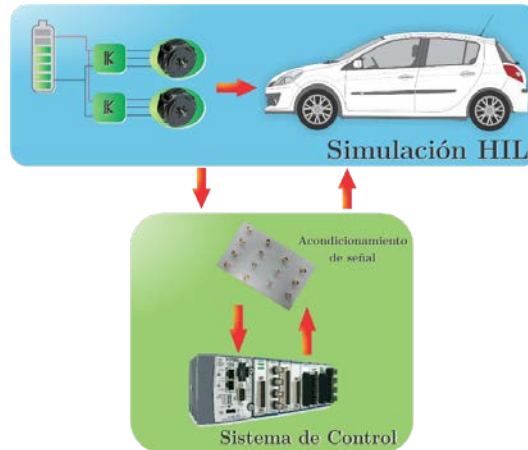


Figura 1 Diagrama general a bloques del banco de pruebas basado en HIL.

Para la realización del HIL se usa el módulo PPC DS1103 de dSPACE® en donde se programa el comportamiento del STE incorporando la dinámica del automóvil en tiempo real, debido a su flexibilidad de uso permite introducir las simulaciones desarrolladas en Matlab-Simulink® mismas que son traducidas a lenguaje máquina una vez que se construye el proyecto necesario.

Los modelos utilizados para realizar la simulación HIL se desarrollan con ayuda de Matlab-Simulink®, a continuación, se listan los modelos que conforman la simulación:

- Modelo de la dinámica del auto.
- Modelo promedio del inversor trifásico.
- Modelo del motor de imanes permanentes.
- Modelo de la batería de alimentación.

### Modelo dinámico del automóvil

Con ayuda de Matlab-Simulink® se implementó el modelo dinámico del vehículo, el cual puede usarse para establecer los requerimientos de tracción del

motor requeridos para su desplazamiento, en este caso se utiliza para determinar los niveles de energía que consumen los motores en las etapas de tracción y de igual forma la energía recuperada durante las etapas de frenado.

Posteriormente, se lleva a cabo el análisis de las fuerzas que actúan sobre el auto para estimar el impacto que ejercen estas sobre el motor. Dichas fuerzas permiten conocer las velocidades adquiridas por el vehículo, además de saber en qué momento regenera energía y el valor nominal de la misma.

La figura 2 muestra las fuerzas que actúan sobre el auto, entre ellas se puede observar la resistencia a la rodadura  $F_r$ , la fuerza de arrastre  $F_a$  y la fuerza de gravedad que actúa sobre el auto y se relaciona con la inclinación del camino.

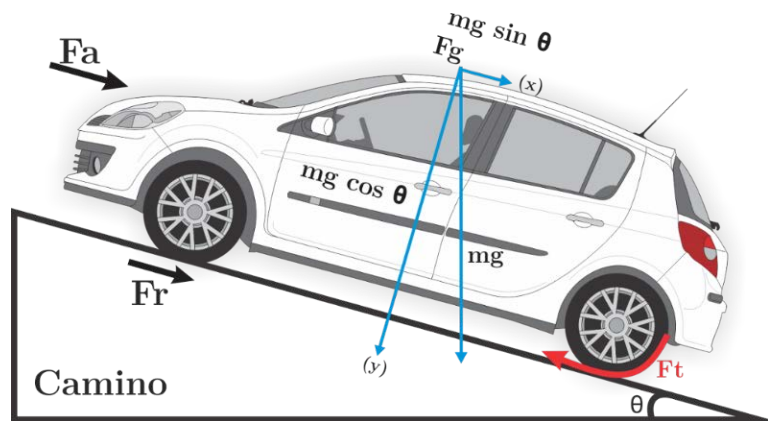


Figura 2 Fuerzas que actúan sobre el auto [10].

A partir de la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo  $dV/dt$  se determina con las fuerzas observadas en la figura 2 obteniendo así la ecuación (1).

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{m} \quad (1)$$

La ecuación 1, describe la segunda ley de Newton, donde  $F_t$  son las fuerzas de tracción,  $F_r$  son las fuerzas de oposición al movimiento y  $m$  es la masa del vehículo. Al analizar las diferentes fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento se determina la ecuación dinámica de este. En [10] se desarrolla a detalle el modelo dinámico longitudinal de un automóvil. Se calcula la fuerza total

requerida por el vehículo para poder moverse en función del movimiento lineal del vehículo, dando como resultado la ecuación 2.

$$F_T = F_r + F_g + F_w + m \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

Despejando la velocidad de la ecuación 2 se obtiene ecuación 3.

$$v = \int (F_T - F_r - F_g - F_w) \frac{1}{m} dt \quad (3)$$

Donde:

- F<sub>T</sub>** Fuerza de tracción ejercida por los motores de imán permanente.
- F<sub>r</sub>** Fuerza de resistencia a la rodadura.
- F<sub>g</sub>** Fuerza gravitacional ejercida sobre el auto.
- F<sub>v</sub>** Fuerza de resistencia aerodinámica.
- m** Masa del vehículo.
- v** Velocidad lineal del auto.

### Modelo del inversor de potencia

Existen dos topologías que son usadas para la conversión de corriente directa a corriente alterna (CD-CA) en aplicaciones industriales de baja, mediana y alta potencia: el VSI (Voltage Source Inverter) y el CSI (Current Source Inverter). Ambos utilizan el mismo arreglo de interruptores conformado por seis dispositivos semiconductores para obtener voltajes trifásicos en el nodo común de cada rama [11]. En este trabajo se presenta el modelo promedio de un VSI descrito a continuación.

El modelo promedio del inversor utilizado en este trabajo elimina los efectos causados por las conmutaciones de los dispositivos; gracias a esto se reduce el tiempo de simulación al tener en cuenta solamente la frecuencia fundamental de salida en el inversor, es decir, que las formas de onda obtenidas en esta forma de modelado son completamente sinusoidales.

El modelo promedio del inversor está definido por los sistemas de ecuaciones 4 y 5.

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_a - d_b \\ d_b - d_c \\ d_c - d_a \end{bmatrix} \cdot V_{CD} = \begin{bmatrix} d_{ab} \\ d_{bc} \\ d_{ca} \end{bmatrix} \cdot V_{CD} \quad (4)$$

$$I_{CD} = \begin{bmatrix} d_{ab} & 0 & -d_{bc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

Donde  $d_a$ ,  $d_b$  y  $d_c$  son las señales de control;  $V_a$ ,  $V_b$ , y  $V_c$  corresponden a los voltajes de línea;  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  y  $V_{ca}$  son los voltajes fase a fase;  $V_{CD}$  es el voltaje en el bus de CD,  $I_{CD}$  es la corriente en el bus de CD,  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  representan las corrientes de fase del inversor.

El sistema de ecuaciones 4, se puede deducir fácilmente igualando la potencia del lado de CD con la potencia obtenida en el lado de CA. Las señales  $d_a$ ,  $d_b$  y  $d_c$  son señales sinusoidales de amplitud unitaria. En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques del inversor, además se observa que las entradas de control  $d_a$ ,  $d_b$  y  $d_c$  son enviadas a fuentes controladas de voltaje o corriente, con el propósito de convertirlas en variables eléctricas obteniendo de este modo las relaciones de voltaje y corriente de entrada y salida del inversor.

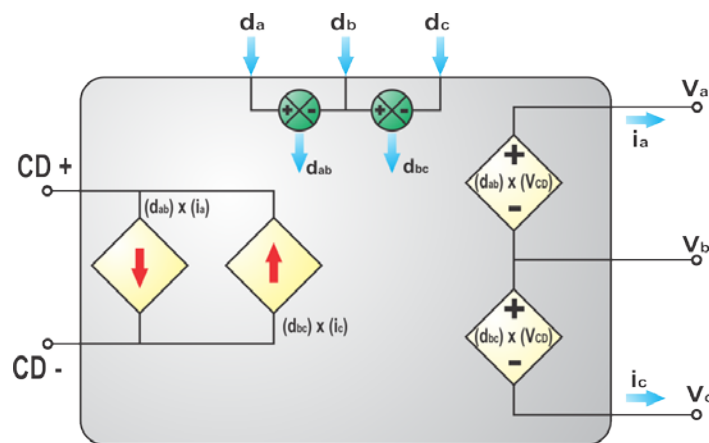


Figura 3 Diagrama a bloques del modelo promedio del inversor.

### Modelo del motor de imán permanente

Para trabajar el modelo de la máquina síncrona de imanes permanentes de flujo axial (MSIPFA), es necesario estudiar los marcos de referencia empleados

en su modelado; así como las transformaciones entre ellos, estos marcos son utilizados en el análisis de sistemas eléctricos trifásicos, y son:

- Marco de referencia estacionario, definido por los ejes **abc** o transformación **DQ**
- Marco de referencia síncrono **dq**

Las transformaciones entre los marcos de referencias son válidas para corrientes, voltajes y flujos de un sistema trifásico balanceado; con ellas se realiza la obtención del modelo de la MSIPFA tal y como se observa en [12].

De la estructura de la MSIPFA que se utiliza es posible obtener las ecuaciones que describen la máquina en el marco de referencia trifásico estacionario **abc** (ecuaciones eléctricas), estas ecuaciones describen el modelo de la MSIPFA (ver ecuación 6).

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 \\ 0 & L_q & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} di_d/dt \\ di_q/dt \\ di_0/dt \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \left( \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_{IP} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \omega \quad (6)$$

En la figura 4 se pueden observar los circuitos equivalentes en el marco síncrono **dq** que representan el modelo de la MSIPFA, estos últimos se obtienen a partir del sistema de ecuaciones mostrado en la ecuación 6.

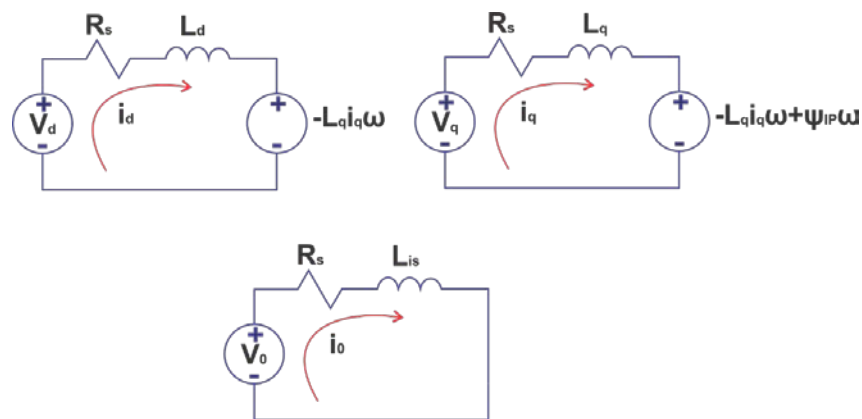


Figura 4 Circuitos eléctricos equivalentes de la MSIPFA.

La ecuación que describe el comportamiento del par electromagnético necesario para realizar el modelado de la MSIPFA es la mostrada en la ecuación 7.



$$T_s = \frac{3}{2} \rho [i_d i_q (L_d - L_q) + i_q \Psi_{IP}] \quad (7)$$

Observando figura 5, se puede determinar la ecuación mecánica del motor, así mismo se pueden observar en dicha figura las fuerzas radiales presentes en la máquina; la ecuación del movimiento mecánico es obtenida a partir de la segunda ley de Newton para un sistema rotacional la cual se muestra en la ecuación 8.

$$\sum T = J\alpha \quad (8)$$

Donde:

- J Momento polar de inercia del motor.
- A Aceleración angular mecánica del sistema.

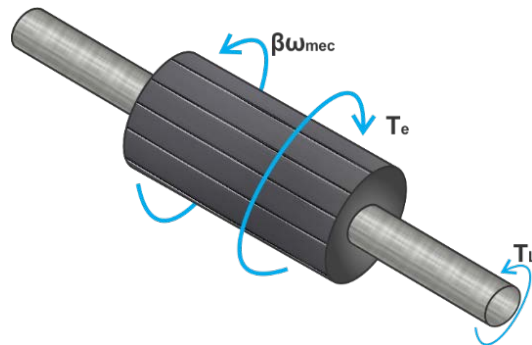


Figura 5 Diagrama de fuerzas que actúan en el rotor de la MSIPFA.

Por lo tanto, la ecuación mecánica obtenida se muestra en la ecuación (9):

$$\frac{J}{\rho} \frac{d\omega}{dt} = T_s - \frac{\beta}{\rho} \omega - T_L \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = \frac{\rho}{J} (T_s - T_L) - \frac{\beta}{J} \omega \quad (9)$$

Donde:

- J** Momento de inercia del motor.
- $\beta$**  Coeficiente de fricción.
- $T_L$**  Par de carga de la MSIPFA.
- $T_e$**  Par electromagnético desarrollado por la máquina.
- $\omega$**  Velocidad angular del rotor dada en rad/s.

Por lo tanto, las ecuaciones utilizadas para realizar el modelo de la MSIPFA son 6, 7 y 9, las cuales pueden ser utilizadas para modelar una Máquina Síncrona de Imanes Permanentes Internos (MSIPI) o una Máquina Simple de Imanes Permanentes Superficiales (MSIPS). Con el fin de simular con mayor rapidez el comportamiento de la MSIPFA se programan las ecuaciones que describen su funcionamiento en un bloque de Matlab®-Simulink®.

El sistema de tracción eléctrica que se simula mediante HIL se muestra en la figura 6, dicha simulación se encuentra conformada por los siguientes modelos:

- En el módulo llamado STE, se incluye el modelo de los dos motores necesarios para mover el auto; de igual modo se incluyen los inversores y las conexiones necesarias para la comunicación entre la simulación HIL y el sistema de control.
- El bloque que simula la dinámica del auto basado en la ecuación (3).
- El modelo del bus de CD que alimenta al sistema de tracción eléctrica, que consiste en una batería con un valor nominal de 300V y 186 Ah.

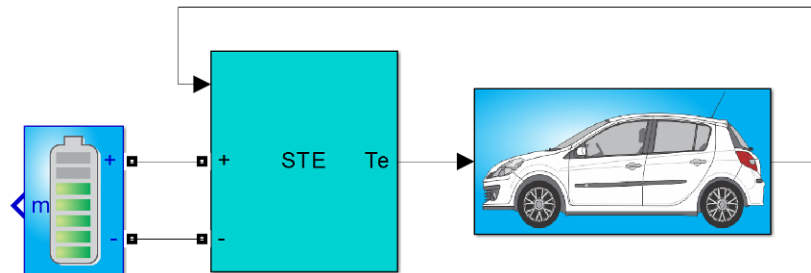


Figura 6 Simulación del STE acoplado a la dinámica del auto.

El sistema de tracción eléctrica se encuentra conformado por dos motores de imanes permanentes cuya velocidad es controlada por medio de dos inversores tipo fuente de voltaje, estos motores se encuentran acoplados directamente a las ruedas traseras del vehículo, por lo tanto la velocidad angular del rotor es igual a la velocidad angular de la rueda, el modelo matemático de estos accionamientos da como resultado el par electromagnético generado por cada uno de los motores el cual después de sumarse sirve como entrada para el modelo dinámico del automóvil (figura 7).

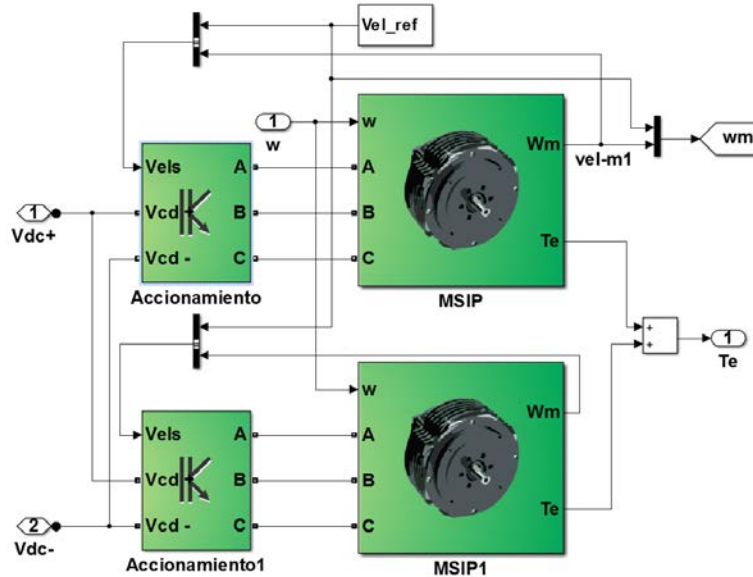


Figura 7 Composición del bloque STE.

### Panel de instrumentación virtual del sistema HIL

Para monitorear el comportamiento de algunas variables de los motores y del vehículo se implementó un panel de instrumentación virtual que imita la apariencia del tablero de un automóvil. El panel se observa en la figura 8, donde se aprecian los indicadores para la velocidad de cada uno de los motores, el velocímetro del automóvil, el nivel de voltaje en las baterías y el estado de carga de las mismas.

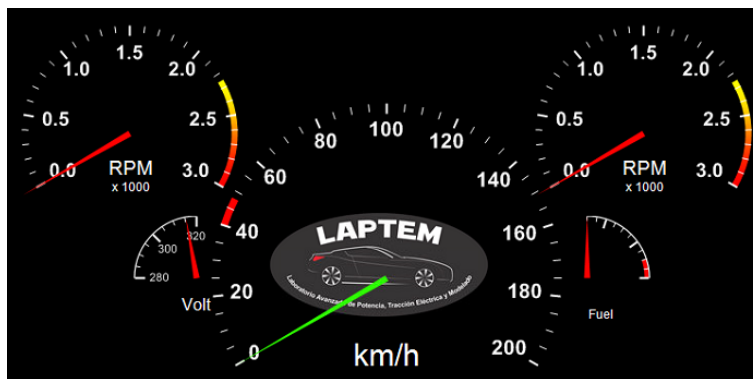


Figura 8 Panel de instrumentación virtual.

Los indicadores son conectados a las diferentes señales con las que cuenta el modelo de Simulink®, de tal forma que es posible observar mediante este panel

el estado de las señales en tiempo real. Es importante configurar de manera correcta las características de las señales a interconectar, debido a que es necesario establecer tanto los rangos máximos y mínimos que pueden tomar dichas variables. Por medio del panel de propiedades se tiene la opción de amplificar o atenuar las señales para ajustarlas a los valores disponibles en los indicadores de tal modo que es posible asegurar la correcta visualización de los niveles de cada variable en cuestión.

### Algoritmo de control de campo orientado

El algoritmo de control de campo orientado a programar en el sistema CompactRIO® [13] es programado mediante LabVIEW®, este algoritmo consta de tres módulos PID con los cuales es posible controlar velocidad, par y flujo del motor. En figura 9, se muestra el algoritmo de control de campo orientado ya programado en LabVIEW.

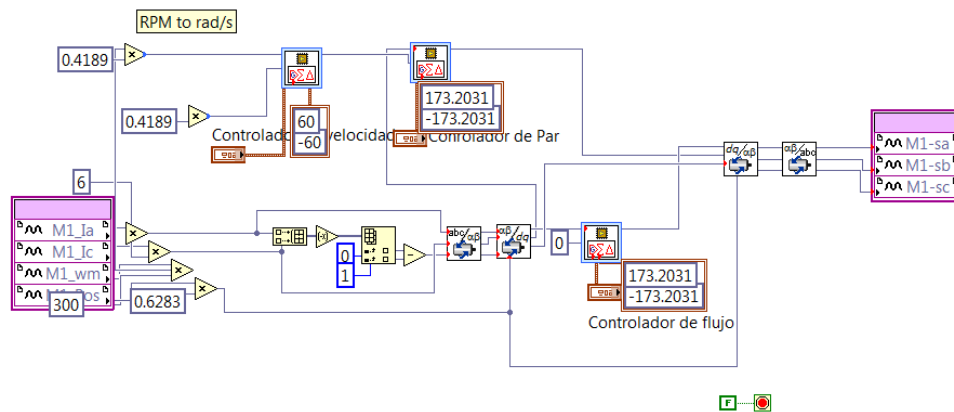


Figura 9 Algoritmo de control de campo orientado programado en LabVIEW.

En la figura 9 se observa que el sistema de control requiere de algunas señales provenientes del sistema de tracción para funcionar, estas señales son: corrientes de fase del motor (por lo menos 2 corrientes), velocidad angular del motor y posición eléctrica del rotor, con estas señales es posible ejecutar el control de velocidad basado en la técnica FOC, además se observa que el sistema de control realiza las transformaciones abc-dq y dq-abc para facilitar los cálculos relacionados con el sistema de control. Como salida del sistema de

control se obtienen tres señales que son utilizadas como señales de control para los inversores, estas señales tienen como características principales, que la forma de onda es sinusoidal y la amplitud máxima de estas señales no debe sobrepasar el valor correspondiente a  $1/\sqrt{3}$ .

En figura 10 se muestra el panel de instrumentación virtual desarrollado para el control de campo orientado, este panel se encuentra conformado por 3 bloques en los que pueden ingresarse las ganancias de los controladores de velocidad, par y flujo respectivamente.

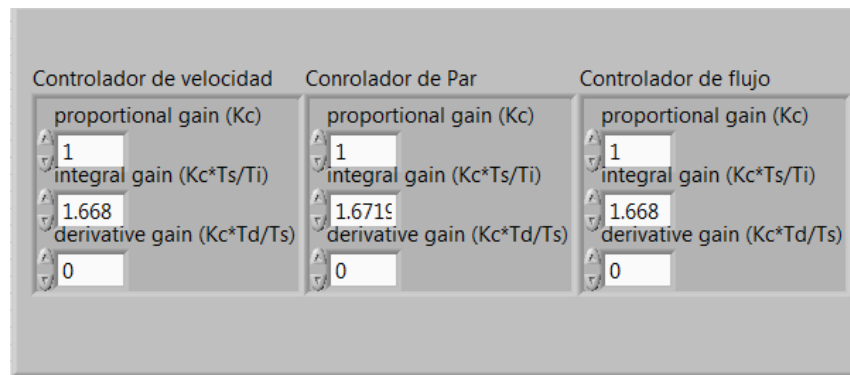


Figura 10 Panel de instrumentación virtual del algoritmo de control de campo orientado.

### 3. Resultados

Una vez teniendo la simulación HIL programada en el sistema dSPACE® y el algoritmo de control de campo orientado ejecutándose en el sistema embebido CompactRIO® se realizó la interconexión de ambos sistemas de tiempo real para así observar el comportamiento del control y determinar así el tiempo de respuesta del sistema de control. La interconexión se realiza por medio de una caja de conexiones diseñada específicamente para esta aplicación, en la figura 11 se muestra la conexión de ambos sistemas de tiempo real.

Para inicializar el proceso de la simulación HIL es necesario llevar a cabo las siguientes acciones:

- Ejecutar la simulación del automóvil cargada en el sistema dSPACE.
- Habilitar la caja de conexión entre el sistema dSPACE

- Verificar que en el panel de instrumentación virtual de la simulación HIL los indicadores se encuentran en la posición inicial
- Iniciar el sistema de control basado en CompactRIO
- Comenzar la prueba del sistema y observar los resultados



Figura 11 Conexión entre la tarjeta dSPACE® y CompactRIO®.

En la figura 12 se muestran las señales de control enviadas a los inversores, además se cuenta con unos indicadores en los que se monitorea el par electromagnético generado por cada uno de los motores, como es de esperarse el par generado debe de ser el mismo, puesto que en este control no se ha implementado ningún diferencial electrónico y ambos motores giran a la misma velocidad, el par nominal de los motores utilizados en el STE es de 40 Nm, este par es el necesario para mantener constante la velocidad en los motores.

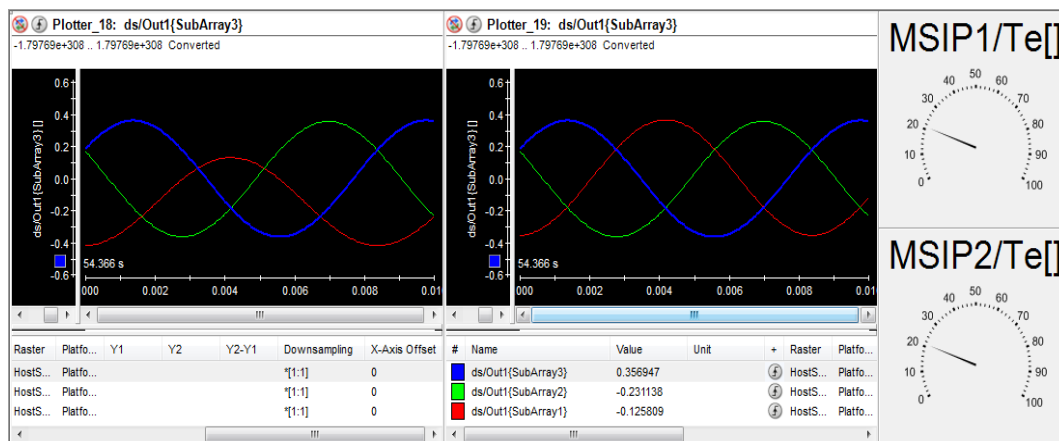


Figura 12 Señales de control enviadas a los inversores y medidores de par motores.

En la figura 13 se muestra el panel de instrumentación virtual en el que se puede seleccionar la señal de velocidad de referencia para el controlador de velocidad, de igual forma se puede monitorear los niveles de corrientes en las 3 fases del motor, la velocidad actual del rotor en RPM y la posición angular que se encuentra entre 0 y  $2\pi$ . Se puede ver que las corrientes se encuentran dentro de los parámetros nominales del motor, que para este caso es de 60A.

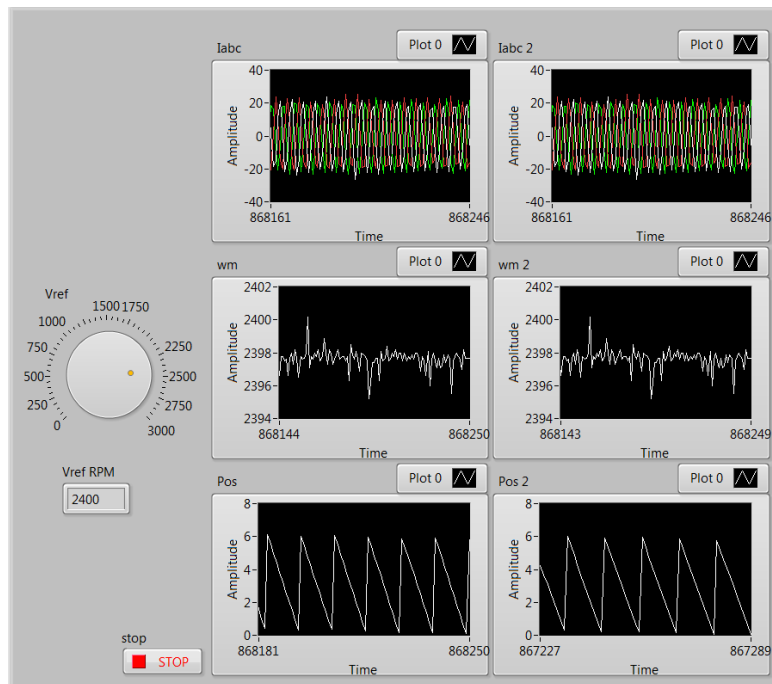


Figura 13 Panel de mediciones del algoritmo de control.

En la figura 14 se muestra el tablero virtual del vehículo en el cual se observa la velocidad máxima del auto, en este caso 150 km/h, esta velocidad se alcanza cuando los motores se encuentran a 3000 RPM; también es posible apreciar que el indicador de voltaje en las baterías que éstas sufren una caída de potencial de 10 V con lo que se encuentra en 290 V, esto se debe a la corriente que exigen los motores para mantener constante la velocidad; el indicador de estado de carga de la batería se posiciona sobre la banda roja, indicando así que el nivel de carga de la batería es muy bajo, por lo que será necesario una recarga pronto. Estos resultados de estado de carga y voltaje se dan después de tener el auto a máxima velocidad durante una hora de simulación aproximadamente.

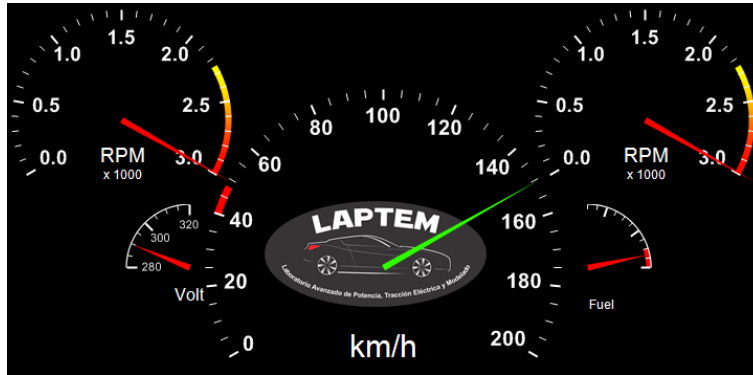


Figura 14 Tablero virtual del automóvil con velocidad máxima.

Al realizar un cambio en la velocidad de referencia del motor, se espera ver como las señales de corriente de fase en las terminales del motor cambian durante el tiempo en el que se alcanza la nueva velocidad de referencia, esto se debe a que el motor demanda mayor corriente durante la etapa de aceleración. En la figura 15 se observa este efecto, además se aprecia que la velocidad de referencia del motor ha sido configurada a 2500 RPM, la velocidad real en ambos motores es de 1540 RPM por lo que la corriente consumida por el motor aumenta ya que el controlador hace que el motor alcance la velocidad planteada.

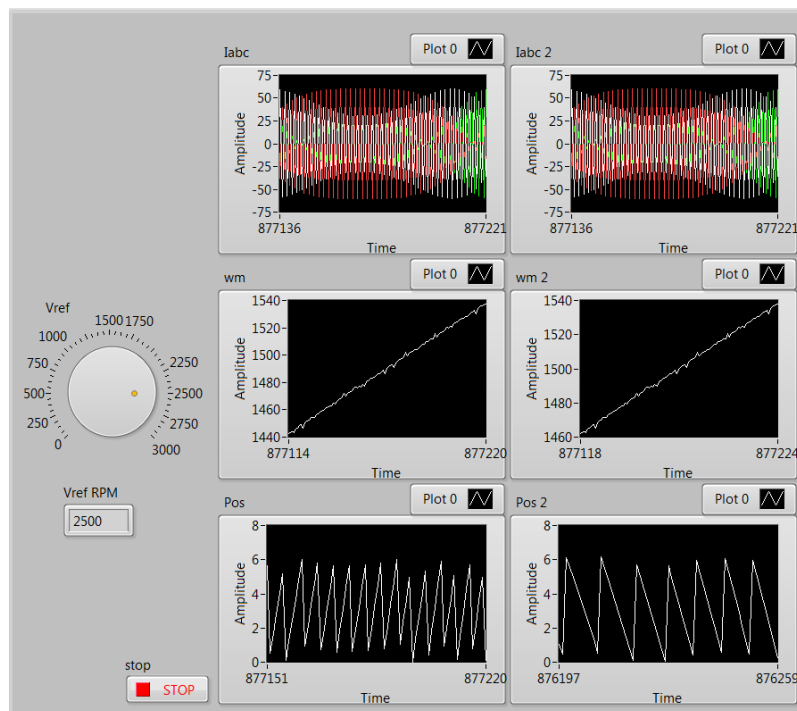


Figura 15 Medición de variables durante el cambio de velocidad de referencia.



Durante una etapa de cambio en la velocidad, las señales de control también se modifican de acuerdo al error por la diferencia entre la velocidad de referencia y la actual del motor, en este caso en la figura 16 se observa un aumento en la amplitud de las señales de control, las cuales se encuentran al máximo puesto que el controlador hace que a la salida del inversor aumente la corriente para aumentar la velocidad del motor; de igual modo se observa que el par generado aumenta debido a la aceleración del motor.

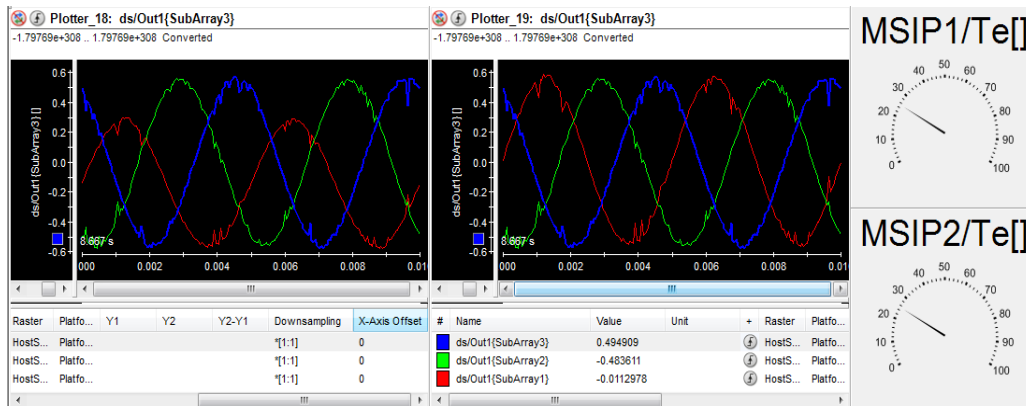


Figura 16 Señales de control durante un cambio de velocidad.

En la figura 17 se muestra el tablero virtual del auto donde se observa un cambio de velocidad comparándolo con la figura 14, se puede apreciar que la velocidad de los motores en el momento de la captura es de 1200 RPM con lo que el auto se desplaza a una velocidad de 60 km/h.

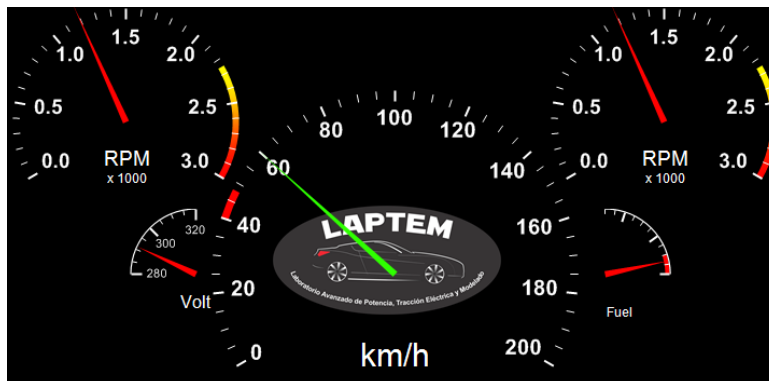


Figura 17 Tablero virtual mostrando un cambio de velocidad.

## 4. Conclusiones

Mediante la simulación HIL del sistema de tracción eléctrica del automóvil se validó el funcionamiento del algoritmo de control de campo orientado para los motores acoplados a una carga que representa la dinámica de un vehículo, con lo que se puede depurar posibles errores en el algoritmo y determinar el tiempo de respuesta del sistema de control. El sistema de control implementado en CompactRIO® funcionó adecuadamente.

Las simulaciones obtenidas a lo largo del desarrollo de este trabajo sirven como una herramienta de ayuda en el proceso de diseño de vehículos eléctricos. Al realizar la simulación dinámica de la mayoría de elementos implícitos en el sistema eléctrico del auto es posible obtener como resultado no solo el comportamiento de cada uno de estos elementos, sino también la factibilidad del uso de estos en el producto final. Teniendo como resultado una plataforma con la cual es posible modificar los parámetros de diseño del auto y obtener resultados de manera gráfica sobre el consumo energético, velocidad máxima del auto y autonomía del mismo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al CONACYT por el apoyo para la realización de este trabajo a través del proyecto "VEUREE" con clave C0011 – CONACYT – CDTI – 191148.

## 5. Referencias

- [1] Emadi, K. Rajashekara, S. Williamson y S. Lukic, "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power systems architectures and configurations". IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 54. Mayo 2005. Pp. 763-770.
- [2] Xu, J. Niu, F. Pei, "Design and simulation of the power-train system for an electric vehicle". Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2nd International Conference. 2011.

- [3] Chen y M. Cheng, "Implementation of a highly reliable hybrid electric scooter drive". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 54. Octubre 2007. Pp. 2462-2473.
- [4] Bouscayrol, "Different types of hardware-in-the-loop simulation for electric drives". *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Junio 2008.
- [5] J. J. Poon, M. A. Kinsy, N. A. Pallo, S. Devadas a, "Hardware-in-the-loop testing for electric vehicle drive applications". *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2012.
- [6] R. V. Chacko, M. L. Sreedevi, G. R. Mineeshma, "Electric vehicle power train simulation in forward modelling approach to enable real-time simulation and HIL controller prototyping". *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014 IEEE International Conference on*, Mumbai, 2014.
- [7] M. A. Bevilaqua, A. Nied, J. de Oliveira, "Labview FPGA FOC implementation for synchronous Permanent Magnet Motor Speed Control". *Industry Applications (INDUSCON), 11th IEEE/IAS International Conference*. 2014.
- [8] Y. Zhu, H. Hu, G. Xu, Z. Zhao, "Hardware-in-the-Loop Simulation of Pure Electric Vehicle Control System". *de International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Bangkok. 2009.
- [9] Jeschke, H. Hirsch, M. Koppers, D. Schramm, "HiL simulation of electric vehicles in different usage scenarios". *Electric Vehicle Conference (IEVC), IEEE International*. 2012.
- [10] L. Guzzella, A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to Modeling and Optimization*. 2005. Berlin: Springer.
- [11] N. Mohan, T. M. Underland, W. P. Robins, *Power Electronics Converters Applications and Design*. 2003. John Wiley & Sons, Inc.
- [12] P. C. Castellanos Morales, "Control vectorial de la velocidad de una máquina síncrona de imanes permanentes". Junio 2011.
- [13] National Instruments, *NI LabVIEW for CompactRIO*. <http://www.ni.com/pdf/products/us/fullcriodevguide.pdf>. Diciembre 2015.

# MEDICIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA EN REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES CON FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

***Luis J. Ricalde Castellanos***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Emmanuel de la Cruz May***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Eduardo E. Ordoñez López***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

***Braulio J. Cruz Jiménez***

Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería  
*lricalde@correo.uady.mx*

## **Resumen**

En el presente trabajo se presenta el diseño de un sistema de gestión de energía, en donde se emplea una tarjeta de medición de potencia, la cual fue elaborada y caracterizada para su implementación en una red eléctrica inteligente. El dispositivo fue elaborado con el propósito de crear una tarjeta de medición de potencia de bajo costo para el monitoreo de la generación de fuentes de energías renovables como son sistemas eólicos y fotovoltaicos. El desarrollo de este dispositivo tiene la finalidad de procesar las mediciones de generación realizadas y de la demanda energética para ser empleadas en un sistema de gestión energética que pueda tomar decisiones de cuales cargas en el edificio puedan ser alimentadas.

Los resultados obtenidos indican que esta tarjeta es una buena alternativa para realizar la gestión y el monitoreo de los sistemas de generación de energías renovables.

**Palabra(s) Clave(s):** Gestión energética, medición de potencia, red eléctrica inteligente, sistema fotovoltaico, sistema eólico.

## 1. Introducción

En la actualidad se vive una crisis de energía debido a que las reservas de los combustibles derivados del carbón se están agotando, encareciéndose su explotación y consumo. Al generar energía con este tipo de combustible se emiten gases de efecto invernadero, causantes del: calentamiento global, la alteración del clima y el hábitat [7].

Los costos de producción y almacenamiento de diversas fuentes de energía renovables de baja capacidad han disminuido considerablemente, en la actualidad se trabaja a nivel mundial en su integración a las redes eléctricas públicas. Los primeros pasos en la integración de fuentes de energía renovable se dieron con la implementación de sistemas híbridos fotovoltaico-eólicos como fuentes complementarias para aplicaciones rurales y conexiones débiles a la red. Actualmente se realiza investigación en la integración de diversas fuentes de energía de pequeña escala tales como solar térmica, biomasa, celdas de combustible y mareomotriz, bajo nuevos y avanzados esquemas de control constituyendo lo que se denomina una red eléctrica inteligente o *smart grid*. Dado que los costos de producción de las aplicaciones fotovoltaicas y eólicas se han reducido considerablemente se han convertido en la elección primaria de generación de energía en las redes eléctricas inteligentes [3].

Una red inteligente es aquella que puede integrar de manera eficiente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a ella, de tal forma que se asegure un sistema energético sostenible y eficiente, con bajas pérdidas y altos niveles de calidad y seguridad de suministro.

La humanidad ha experimentado en el último siglo un desarrollo inmenso sustentado en el consumo energético basado en el aprovechamiento de fuentes

de energía de origen fósil. Estas energías han sido explotadas suponiendo una disponibilidad ilimitada, y sin valorar en ningún momento los costes ambientales ocasionados [1].

Basados en la forma de consumir combustibles fósiles, el ser humano se ha enfocado hasta la actualidad, en un modelo energético en el cual se sigue una rigurosa cadena que se lleva a cabo en el siguiente orden: generación, distribución, transporte y consumo.

Sin embargo, el cambio de este modelo es más que una necesidad hoy en día, tendiendo el nuevo modelo a la diversificación de las fuentes de energía, un mayor aprovechamiento de las energías renovables y la eficiencia y el ahorro energético.

El nuevo modelo energético pretende transformar el sistema actual en un sistema distribuido, en el cuál cualquier agente que esté conectado a la red tiene la posibilidad de aportar energía, posibilitando la creación de microgeneradores, de forma que no exista una dependencia tan directa como con la generación energética actual [8].

Gracias a las redes inteligentes es posible disminuir drásticamente las pérdidas por el transporte energético, facilitar la conexión a la red de todo tipo de energías renovables (facilitando la integración de energías como la eólica y solar), soportar las capacidades de almacenamiento energético y la conexión de vehículos eléctricos o híbridos.

A pesar de que no existe una definición general estándar de una red eléctrica inteligente, la Plataforma Tecnológica Europea de *Smart Grids* (*Smart Grids: European Technology Platform*) define una red eléctrica inteligente como “Una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el comportamiento y las acciones de todos los usuario conectados a ella, generadores, consumidores y aquellos que realizan ambas acciones, con la finalidad de distribuir de forma segura y eficiente el suministro eléctrico, desde el punto de vista sostenible y económico” [6].

## **2. Desarrollo**

### **Energía eólica**

La energía eólica es una de las energías abundantes y renovables de la naturaleza. Proviene de la conversión de la energía cinética que traen las masas de aire en movimiento hacia energía mecánica y luego a energía eléctrica. Para conseguir esta conversión se utilizan máquinas llamadas aerogeneradores. Estos dispositivos, a través de una superficie aerodinámica expuesta al viento, producen trabajo mecánico en un eje.

Para llevar adelante estas transformaciones se utilizan distintos tipos de máquinas. Generalmente no se requieren grandes velocidades de viento para producir energía. En la mayoría de los casos los equipos están diseñados para comenzar a generar energía con velocidades del viento de unos 15 km/h. y entregan su potencia máxima a una velocidad del orden de los 40 a 55 km/h.

Para sistemas conectados a la red, los componentes de balance del sistema incluirán un controlador, baterías de almacenamiento, una unidad rectificadora de señal (inversor) y el cableado. En caso de sistemas que no están conectados a la red de suministro, requieren el uso de baterías para almacenar la energía excedente generada, y usarla cuando no exista viento. Asimismo, requieren un controlador de carga para proteger a las baterías de una sobrecarga [2].

### **Energía solar**

La energía solar es la energía producida por el Sol y que es convertida a energía útil por el ser humano. El Sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el ser humano ha utilizado a lo largo de la historia.

La radiación del Sol que llega a la atmósfera de la Tierra disminuye por diversos elementos, como son, la absorción de la radiación, los gases en la atmósfera, como dióxido de carbono, ozono, y otros gases más, por el vapor de agua, por las partículas de polvo, moléculas y gotas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación en la que se recibe la radiación.

Las principales componentes de un sistema fotovoltaico conectado a la red son: el arreglo fotovoltaico, que es el elemento encargado de transformar la luz del sol

en electricidad; y un elemento acondicionador de la potencia producida (un inversor CD/CA), cuya función es adecuar la energía generada por el arreglo a las características eléctricas de la red para su conexión a ésta.

Un arreglo fotovoltaico está constituido por un determinado número de módulos o unidades fotovoltaicas individuales. El número de unidades depende de la potencia nominal requerida en el arreglo y de la potencia pico de los módulos seleccionados. El voltaje de salida del arreglo, que corresponde al voltaje de operación del inversor se obtiene mediante la conexión serie de un número determinado de módulos; y la potencia, a través de la conexión en paralelo de dichas series [5].

### **Sistema de gestión de energía**

Un sistema de gestión energética (SGE) puede definirse como una metodología para lograr la mejora sostenida y continua del desempeño energético. La implementación de un SGE no debe entenderse como un objetivo por sí mismo, es decir, lo realmente importante son los resultados de todo el sistema. Entendida de este modo, la efectividad de un SGE dependerá, en gran medida, del compromiso y disponibilidad de todos los actores involucrados para gestionar el uso y el costo de la energía [4].

Los SGE persiguen la mejora continua en el empleo de la energía mediante un uso más eficiente de la misma, reduciendo su consumo, los costes financieros asociados y las emisiones de gases de efecto invernadero, así como mediante el mejor aprovechamiento de las energías renovables.

Un SGE aporta los beneficios siguientes:

- Ayuda a identificar, priorizar y seleccionar las acciones para la mejora del desempeño energético, con base en su potencial de ahorro y el nivel de inversión requerido.
- Reduce costos al aprovechar al máximo los recursos energéticos.
- Impulsa la productividad y el crecimiento (mayor aprovechamiento, menor desperdicio).
- Promueve las mejores prácticas de gestión energética.



- Asegura la confianza y calidad de la información que se utiliza para la toma de decisiones.
- Facilita la integración de sistemas de gestión ya existentes.
- Transformación entrada-salida. El proceso de aprendizaje de la red, consiste en presentarle un ejemplo y modificar sus pesos sinápticos de acuerdo con la respuesta deseada. Aprende, por lo tanto, una transformación entrada-salida.
- Adaptabilidad. La red tiene la posibilidad de adaptar sus pesos sinápticos a los cambios en su medio ambiente, es capaz de cambiar dinámicamente.
- Tolerancia a fallas. Debido a la interconexión paralela, la falla de un procesador no impide que la red continúe presentando un buen comportamiento.

### **Tarjeta de medición de potencia**

Una tarjeta de medición de potencia, permite la medición de variables de corriente y de voltaje, es decir que con éste dispositivo podemos reemplazar el uso de vóltmetros y ampérmetros, adicionando la capacidad de medir energía e incorporando beneficios adicionales como la comunicación por medio de protocolos ZigBee, con los que podemos integrar estos equipos a un software para realizar gestión de energía implementando un sistema de monitoreo.

Un sistema de monitoreo de indicadores energéticos es aquel capaz de registrar variables eléctricas de interés que en determinado momento proporcionen información para establecer el comportamiento de un sistema de potencia. Es importante contar con este sistema en donde se midan en tiempo real las variables de los equipos y sistemas a fin de vigilar su desempeño energético y operativo.

La tarjeta de medición propuesta cuenta con dos transductores de voltaje y cuatro transductores de corriente, los cuales convierten las variables energéticas de entrada en otras variables de salida de valores muy pequeños. Los datos resultantes pasan a través de unos filtros pasa bajos de orden 6, diseñados para acondicionar la señal y finalmente dirigirlos a las entradas analógicas de un

“Arduino DUE”. Se conecta un módulo Xbee para llevar a cabo una comunicación con el ordenador y obtener los datos de medición en tiempo real.

Los Xbee son dispositivos inalámbricos fabricados por Digi International, tienen su propio protocolo de comunicación por radio frecuencia, son robustos, de bajo costo, bajo consumo y tienen un alcance en sus distintos modelos entre 100 metros y los 10 kilómetros. Los dispositivos Xbee utilizan el protocolo IEEE 802.15.4 mejor conocido como ZigBee, estos fueron diseñados para aplicaciones que requieren de un alto tráfico de datos, baja latencia y una sincronización de comunicación predecible.

En la figura 1, se muestran los principales componentes del sistema de generación eólica instalado en la Facultad de Ingeniería de la UADY. La energía proveniente de las turbinas pasa a través del tablero de control, donde se verifica que se encuentre dentro de los rangos de operación permitidos, de lo contrario la turbina se protege apagando todo el sistema. Posteriormente, la energía producida se dirige a los rectificadores que cuentan con resistores de regulación. Los resistores entran en funcionamiento cuando existe excedente de energía. De la energía resultante al pasar por los rectificadores, se generan dos corrientes y un mismo voltaje para cada par de rectificadores. En esta etapa del proceso de generación del sistema eólico es donde se toma la medición de los voltajes y corrientes para el dispositivo propuesto.

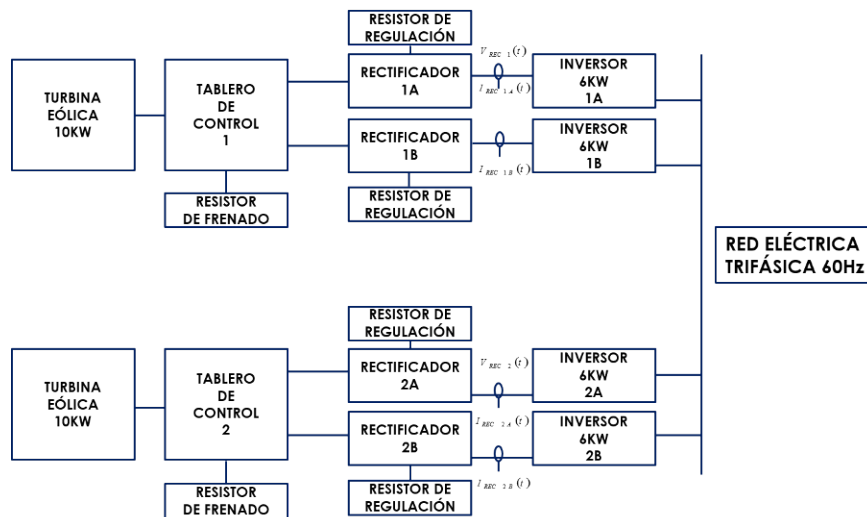


Figura 1 Esquema de medición de potencia en sistemas eólicos.

En la figura 2, se observa que las corrientes y voltajes adquiridos pasan a través de los transductores de voltaje y corriente respectivamente. La transformación resultante pasa a través de unos filtros pasa bajos de orden 6 para el acondicionamiento de la señal que entra por los puertos analógicos de un Arduino DUE para posteriormente transmitir la información mediante un módulo Xbee a un ordenador.

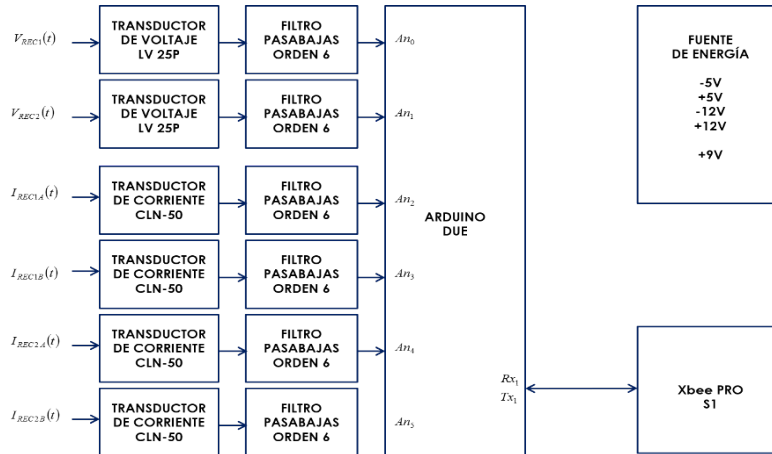


Figura 2 Procesamiento de las variables de medición.

Se cuenta con fuentes de alimentación variadas,  $\pm 5$  V para la alimentación de los filtros pasa bajos,  $\pm 12$  V para la alimentación de los transductores y +9 V para el Arduino DUE. Entre sus características de corriente y voltaje, la tarjeta de medición de potencia soporta hasta 440 V y un máximo de 50 A.

Se realizó del diseño del circuito en el software Altium Designer, donde se verificó que los componentes se encontraran distribuidos de uniformemente, y que existiera suficiente espaciado entre los mismos como se muestra en la figura 3. Posteriormente se obtuvieron las coordenadas para la elaboración de la tarjeta en la máquina CNC de circuitos impresos, obteniendo como resultado la tarjeta mostrada en la figura 4.

### Potencia activa (P)

Es aquella que se aprovecha como potencia útil. También se llama potencia media, real o verdadera y se debe a los dispositivos resistivos. Su unidad de medida en el watt (W).

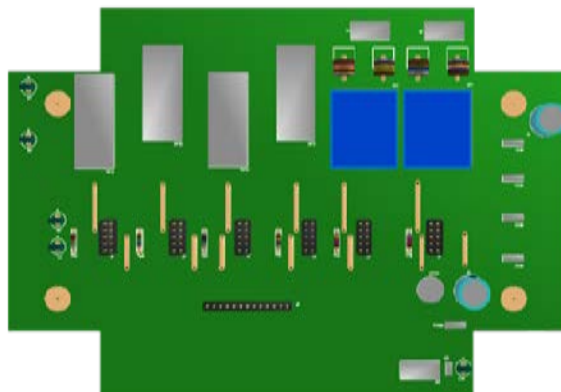


Figura 3 Diagrama en 3D de la tarjeta de medición de potencia.

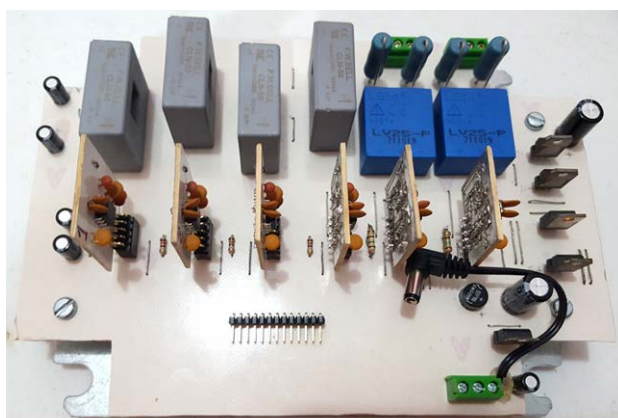


Figura 4 Tarjeta de medición de potencia.

### **Potencia reactiva (Q)**

Es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores. Su unidad de medida es el voltamperio reactivo (VAR).

### **Potencia aparente(S)**

Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva y representa la ocupación total de las instalaciones debida a la conexión del receptor. Su unidad de medida es el voltamperio (VA).

### 3. Resultados

En la figura 5, se muestra la caracterización de los filtros pasa bajos de acondicionamiento de señales que se elaboraron para la tarjeta de medición de potencia. Se graficó el comportamiento de cada uno de los filtros, variando la frecuencia de 0 hasta 2000 hertz. Se observa que la banda de transición empieza alrededor de los 800 hertz y termina en los 1200 hertz. La frecuencia de corte 800 hertz equivale a la 13a. armónica de 60 hertz, ya que únicamente se utilizaron ondas senoidales para realizar la caracterización de los filtros.

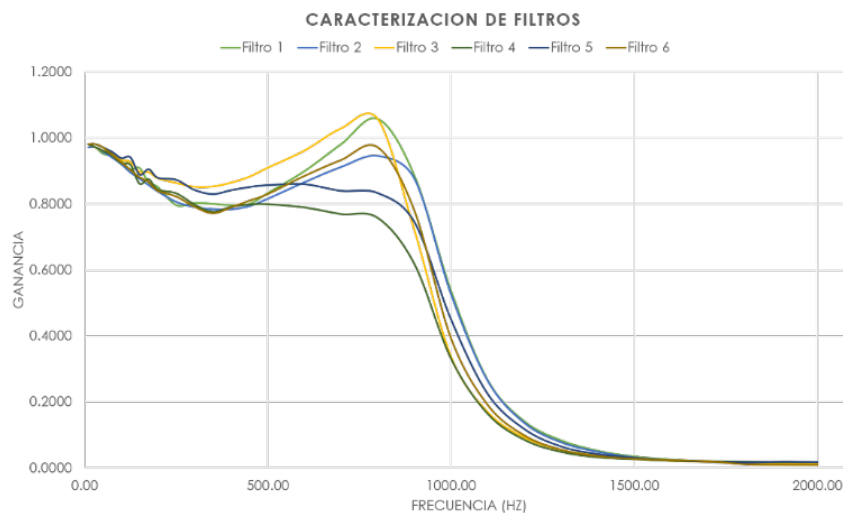


Figura 5 Gráfica de caracterización de filtros pasa bajos.

A pesar de las variaciones que se observan en la respuesta de magnitud en el rango de [0.8 a 1.00], la fidelidad de los filtros es completa ya que los filtros empleados no interrumpen con la señal de muestreo del sistema. Estas no afectan a las señales que se procesan en el Arduino DUE, debido a que el rango de frecuencia de las señales con las que se trabajó está comprendido entre 0 y 10 hertz siendo la señal muy constante y con oscilaciones mínimas.

La comprobación de los 4 transductores de corriente se llevó a cabo en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería de la UADY, donde se verificó el funcionamiento de cada uno de los sensores de corriente de la tarjeta. En esta prueba se varió la corriente que circulaba a través del sistema desde 0 hasta 20

Amperes. Como se muestra en la figura 6, el comportamiento de los transductores es lineal con algunas variaciones, mismas que se corregirán en la programación del Arduino DUE. Así mismo se conectó la tarjeta a la corriente alterna con 180 V pico, empleando un rectificador de media onda, obteniendo en ambos transductores de voltaje una medición de 1.40 V pico.

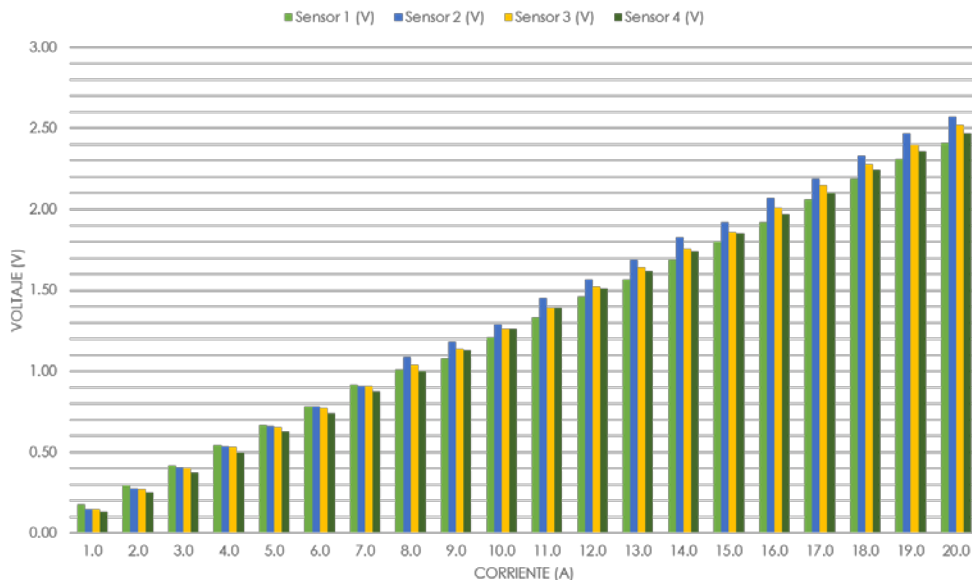


Figura 6 Medición de los sensores de corriente.

Como se puede apreciar en la figura 7 y figura 8, el analizador de energía de Fluke es más preciso al lograr detectar pequeños cambios en la generación de energía del sistema. Sin embargo, la tarjeta de medición de potencia presentada de acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente, se asemeja al comportamiento que nos muestra el analizador de calidad de potencia Fluke. Cabe destacar que se calibró mediante software la tarjeta de medición propuesta.

#### 4. Discusión

Algunas compañías del mercado han desarrollado nuevos sistemas para la medición de energía que ponen al alcance de los usuarios industriales prestaciones de calidad de energía y análisis que eran exclusivos de los medidores de gama avanzada. Estos medidores permiten recopilar, almacenar y analizar información de los sistemas, adaptándose a las necesidades de hoy y

del futuro, ayudando a todo aquel usuario industrial que busque conocimiento total de su consumo y que requiera alta confiabilidad y disponibilidad en la red eléctrica.

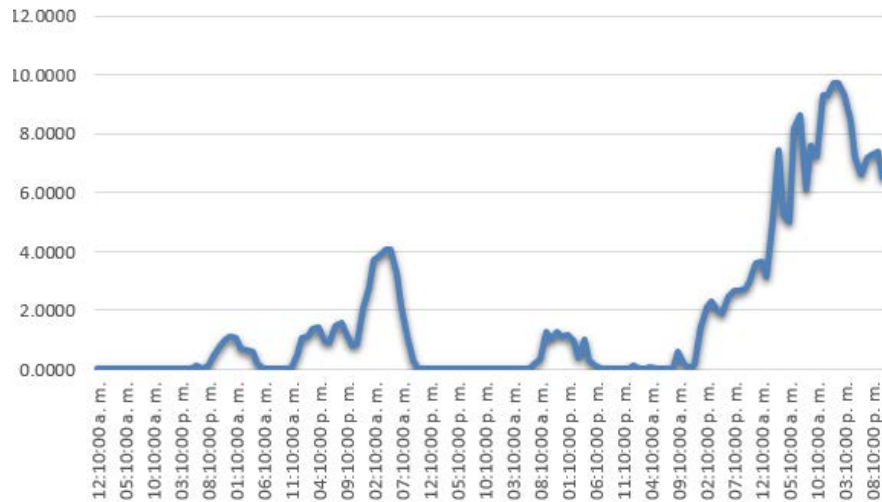


Figura 7 Gráfica de generación de una turbina empleando la tarjeta de medición.

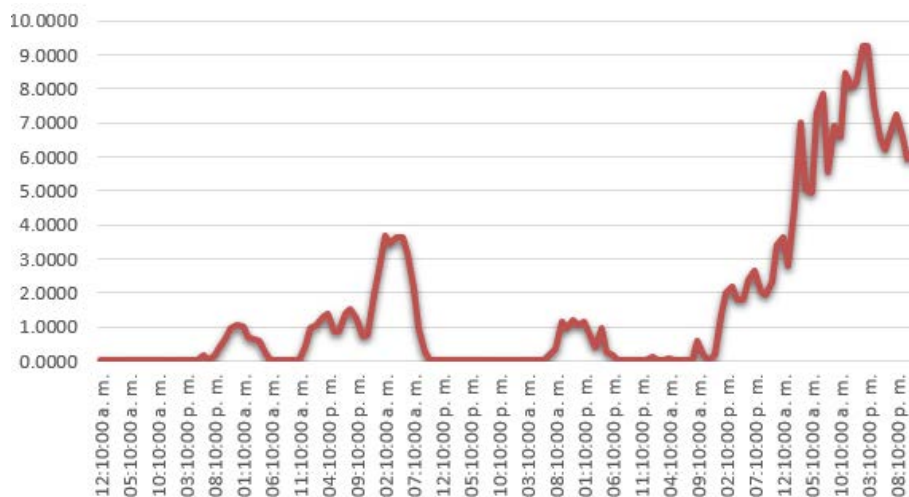


Figura 8 Gráfica de generación de una turbina empleando el analizador FLUKE.

Los analizadores de calidad de potencia Fluke son una opción para implementar sistemas de gestión de energía, estos permiten localizar, predecir, evitar y solucionar problemas en los sistemas de distribución de alimentación e incluyen numerosas características para capturar detalles que permiten detectar problemas rápidamente y de manera segura. La solución de problemas es rápida

gracias a la visualización en display de tendencias y sucesos capturados, mientras la grabación de fondo continúa.

Los sistemas Fluke cuentan con la herramienta de localización de averías completa en tres fases: mide la tensión, la corriente, la frecuencia, la potencia, la fluctuación, la armonía, y el consumo de potencia (energía). La desventaja de emplear estos sistemas para la gestión energética como monitoreo de la producción de energía de fuentes renovables es debido al elevado costo de los equipos, el riesgo que implica dejar el equipo en cuartos de control por tiempo indefinido, donde podría presentar alguna avería del equipo. Otra de las desventajas que presenta es en la obtención de datos, ya que se requiere extraerlos de forma manual, por otro lado la tarjeta que se elaboró es ideal para el monitoreo en tiempo real de generación de energía, debido a la transmisión de datos vía inalámbricamente, con esta característica la tarjeta sólo necesita ser instalada en el lugar que se desee tomar mediciones, sin la necesidad de extraer manualmente los datos, además el costo de elaboración de la misma es mucho menor al de los equipos Fluke y otros sistemas.

## **5. Conclusiones**

En los últimos años ha crecido de manera importante la creación de conciencia acerca de las ventajas del ahorro energético y la búsqueda por implementar sistemas de administración de energía.

La importancia de contar con un sistema permanente de medición, es que lleva a los usuarios tarde o temprano a lograr mejoras en el sistema eléctrico y a la obtención de ahorros de energía sustentados en una base real de comparación, así como en una verdadera administración del flujo energético.

Los resultados de este trabajo podrán extenderse para el monitoreo de generación de energía de diferentes tipos de fuentes renovables contando con datos en tiempo real para posteriormente implementarse en un sistema de gestión de micro redes empleando redes neuronales artificiales, tomando decisiones de donde tomar la energía demandada de acuerdo a los datos de generación obtenidos, y costos de generación de las distintas fuentes.



Cabe resaltar que cada vez, adquiere mayor importancia el conocer la eficiencia de una red eléctrica, lo que se convierte en herramienta fundamental para reducir el impacto tanto económico como ambiental.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Carta, Calero, Colmenar, Castro, Centrales de Energía Renovables. 2009. Pearson.
- [2] Y. Hidaka, K. Kawahara, Modeling of a hybrid system of photovoltaic and fuel cell for operational strategy in residential use. 2012. 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). London. Pp. 1-6.
- [3] M. Gamez, "Optimal operation via a recurrent neural network". The 2011 International Joint Conference on Neural. Vol. 9. Num. 3. 2011. Pp. 945-953.
- [4] M. Osswald, Integrated Fuel Cell & Electrolyzer System for energy harvesting, storage and supply, Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC). Proceedings of 2013 35th International. Pp. 1-5.
- [5] R. M Oviedo, Z. Fan, M. Sooriyabandara, Ecoisland: A hydrogen refueler and storage system with renewable energy sources. T&D Conference and Exposition, 2014.
- [6] L. J. Ricalde, Inverse Optimal Adaptive Recurrent Neural Control with Constrained Inputs, Tesis de doctorado. 2005. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Guadalajara, México.
- [7] L. J. Ricalde, E. Ordoñez, M. Gamez y E. Sanchez, "Design of a Grid Management System with Renewable Energy Generation". IEEE Symposium Series on Computational Intelligence Applications in Smart Grid. 2011. Pp. 1-4.
- [8] J. Wang, "Analysis and design of a recurrent neural network for linear programming". IEEE Trans Circuits. Vol. 40. Num. 9. September 1993. Pp. 613-618.

## **7. Autores**

Ing. Emmanuel de la Cruz May, obtuvo el título de Ingeniero en Mecatrónica de la Universidad del Valle de México, Campus Mérida en 2013. Actualmente está finalizando sus estudios de posgrado en Energías Renovables en la Facultad de Ingeniería de la UADY. Sus áreas de interés son la instrumentación electrónica y las redes eléctricas inteligentes.

M.I. Eduardo E. Ordoñez López es Maestro en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente se desempeña como profesor titular de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán en donde coordina el programa educativo de la Licenciatura en Energías Renovables. Realiza investigaciones en los campos de la energía eólica, gestión energética y naturación en edificios.

Dr. Luis J. Ricalde Castellanos recibió el título de Ingeniero Mecánico del Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán, México en 1999, la Maestría en Control Automático y el doctorado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-IPN (Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional), Guadalajara, México, en 2001 y 2005. Desde 2007, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como profesor investigador del programa de posgrado en Ingeniería opción Energías Renovables. Su interés de investigación es el control neuronal no lineal, las redes eléctricas inteligentes, sistemas de generación de energía fotovoltaica y eólica. Se le concedió el Premio del Arturo Rosenblueth en 2005 y es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México (SNI-1).

C. Braulio Cruz Jiménez obtuvo su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Automatización por el Tecnológico de Monterrey, su área de investigación son los sistemas de control y procesamiento de señales. Desde 2005, ha estado con la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) como Coordinador del programa de Licenciatura en Ingeniería en Mecatrónica.

# **ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO CON FINES DE INVESTIGACIÓN**

## ***Fernando Isidoro Quiroz Vázquez***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
*fernando.iqv@hotmail.com*

## ***Juan Alejandro González Rivera***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
*juanalejandroiea@hotmail.com*

## ***Juan Carlos Coronado Vázquez***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
*juancarlos.corvaz@hotmail.com*

## ***Víctor Manuel Cárdenas Galindo***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
*vcardena@uaslp.mx*

## ***Ana Cecilia Rivera Rivera***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería  
*ana.rivera@uaslp.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta una metodología para planear la instalación apropiada de módulos fotovoltaicos con una capacidad de 24 kWp, los cuales serán instalados en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y serán usados con fines de investigación en el área de convertidores de electrónica de potencia interconectados para fuentes alternas de energía. Dicha metodología abarca desde el cálculo de ángulos de colocación de los módulos fotovoltaicos (acimut e inclinación), espaciamiento apropiado entre módulos para evitar sombra entre los mismos, distribución de conexiones serie y paralelo entre módulos para lograr

niveles de corriente y tensión apropiados, cálculo de pérdidas por efecto Joule, así como el cálculo de calibres apropiados para los conductores de interconexión.

**Palabra(s) Clave(s):** Distribución de energía, pérdidas por conducción, sistemas fotovoltaicos.

## 1. Introducción

El aprovechamiento de la energía solar para la generación de energía eléctrica a través de sistemas fotovoltaicos ha tomado auge en los últimos años en México, con una generación reportada de 85 GWh en el año 2014 [1]. La participación de la energía fotovoltaica en la capacidad de generación es de 113.7 MW, un 0.2% de la capacidad global del país. Sin embargo existe un potencial aprobado de 8,171 GWh. Esto es posible debido a que este tipo de generación de energía se considera energía renovable, lo que implica que no hay un costo asociado por la materia prima: “radiación solar” [3,4]. Además, el posicionamiento geográfico de México permite una muy buena captación de energía solar, lo que potencializa la instalación de sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica. Desde el punto de vista económico la instalación de estos sistemas es posible debido a que durante el proceso de la Reforma Energética se marcó la pauta para que los usuarios privados fueran capaces de generar energía eléctrica a través de diferentes formas de producción de la misma. Una vez contemplados estos puntos se debe de examinar la correcta instalación de los sistemas fotovoltaicos, lo que permite optimizar la extracción, pérdidas y flujos de energía para tener un mejor aprovechamiento del recurso. En este documento se analiza la forma de cómo hacer un dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos para poder obtener niveles de tensión, corriente, pérdidas por conducción y un aprovechamiento del espacio, adecuados, orientando la metodología para contar con una instalación que permita desarrollar investigación en el área de convertidores de electrónica de potencia para fuentes alternas de energía. La instalación debe ser flexible, de manera que se pueda cambiar el arreglo de conexión entre los módulos fotovoltaicos, modificando la cantidad de módulos por cadena (*string*), así como el número de cadenas en paralelo. La

selección del calibre del conductor para el cableado considera el nivel de pérdidas por conducción, de manera que se pueda maximizar el aprovechamiento de la energía eléctrica generada, y que será procesada por el convertidor de electrónica de potencia. Así mismo, se debe garantizar que el nivel máximo de tensión de operación diferencial respecto a tierra esté dentro de la capacidad de los módulos fotovoltaicos en todo el rango de operación.

## 2. Desarrollo

### Ubicación y coordenadas geográficas

En la figura 1 se muestra un mapa de radiación solar de México [4], en el cual se pueden observar los niveles de irradiación en kilowatts hora por metro cuadrado al día.

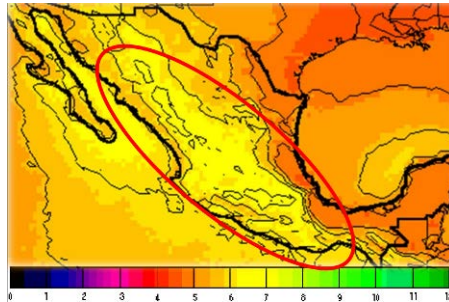


Figura 1 Mapa de radiación solar de México.

En todo el territorio nacional se aprecia que existen altos índices de radiación solar. En particular, en el estado de San Luis Potosí es rentable el uso de este tipo de tecnología para la generación de energía eléctrica, y por lo tanto es importante realizar investigación en dicho ámbito.

Para esta investigación se cuenta con 96 módulos fotovoltaicos de 250 W, de la marca ERDM Solar. En tabla 1 se muestran las principales características [5] y en figura 2 se muestran las características físicas.

Tabla 1 Datos técnicos del módulo fotovoltaico.

$P_{m\acute{a}x}$ (W)	Máximo Voltaje del sistema	$V_{nom}$ (V)	$I_{nom}$ (A)	$V_{oc}$ (V)	$I_{sc}$ (A)	Temperatura de operación	Valor máximo de fusible
250	1000 V	30.99	8.06	36.69	8.61	-40 a 90 °C	15 A

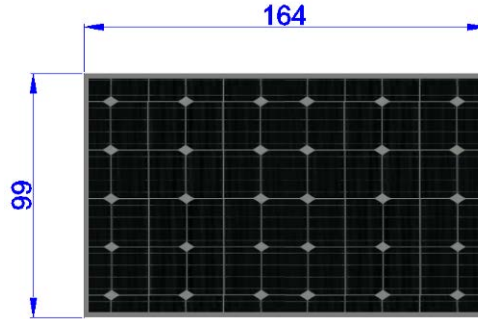


Figura 2 Dimensiones del módulo fotovoltaico en cm.

La instalación de los módulos fotovoltaicos se llevará a cabo en el Laboratorio de Calidad de Energía Eléctrica y Control de Motores de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, en la ciudad de San Luis Potosí. La ubicación geográfica de la instalación fotovoltaica tiene las siguientes medidas de latitud y longitud respectivamente:  $\Phi = 22.1435^\circ$  y  $\lambda = -101.0156^\circ$ . De acuerdo al sitio web de la NASA [6], el ángulo óptimo de inclinación de los módulos fotovoltaicos es de  $\beta = 22.1^\circ \approx 20^\circ$ , tabla 2 y figura 3.

Tabla 2 Radiación solar y ángulo óptimo de inclinación [6].

Minimum Radiation Incident On An Equator-pointed Tilted Surface (kWh/m <sup>2</sup> /day)													
Lat 22.144 Lon -101.016	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
SSE MIN	3.40	4.88	5.66	6.05	6.12	5.91	5.04	5.49	4.73	4.66	4.32	3.80	5.00
K	0.47	0.59	0.59	0.57	0.55	0.53	0.45	0.51	0.48	0.53	0.58	0.56	0.53
Diffuse	1.40	1.44	1.73	2.06	2.28	2.39	2.46	2.26	2.07	1.66	1.28	1.19	1.85
Direct	5.00	7.16	7.11	6.85	6.09	5.65	4.33	5.11	4.42	5.84	6.33	6.14	5.83
Tilt 0	3.29	4.85	5.59	5.94	6.09	5.88	5.02	5.37	4.66	4.62	4.29	3.69	4.94
Tilt 7	3.52	5.16	5.79	5.98	6.02	5.93	4.95	5.37	4.75	4.84	4.65	4.03	5.08
Tilt 22	3.90	5.63	5.98	5.86	5.65	5.82	4.65	5.19	4.77	5.15	5.26	4.61	5.20
Tilt 37	4.08	5.80	5.86	5.45	5.02	5.44	4.15	4.76	4.57	5.19	5.57	4.94	5.06
Tilt 90	3.09	4.01	3.26	2.29	1.84	2.42	1.74	1.96	2.40	3.36	4.28	3.94	2.87
OPT	4.10	5.80	5.98	5.98	6.09	5.93	5.02	5.38	4.79	5.21	5.61	5.01	5.40
OPT ANG	42.0	38.0	24.0	9.00	0.00	9.00	0.00	4.00	16.0	32.0	45.0	48.0	22.1

Una vez determinado el ángulo de inclinación, se procede a calcular el ángulo de orientación (también conocido como ángulo de acimut) para la ubicación de la instalación, el cual corresponde a  $187^\circ$ , con un valor promedio de  $206^\circ$  para todo

el año (figura 4). Por lo tanto, basta simplemente orientar los módulos fotovoltaicos hacia el sur, como se puede observar en el mapa [2,7].

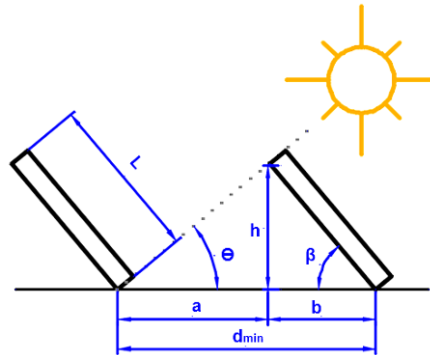


Figura 3 Parámetros del sistema físico [2,3].



Figura 4 Vista superior del edificio indicando la zona de instalación.

### Cálculo de la distancia mínima entre módulos fotovoltaicos $d_{\min}$

La distancia mínima entre filas de módulos fotovoltaicos es muy importante (figura 3), ya que dicha distancia marca el límite que alcanza la sombra ocasionada por la fila frontal del acomodo. Para calcular esta distancia se toma como referencia el día del año en el cual los módulos fotovoltaicos generan una sombra mayor. Dicho día corresponde al 21 de diciembre, en donde el sol a lo largo del día se desplaza a una altura menor a la de los demás días del año. Las ecuaciones 1 y 2 representan lo mencionado anteriormente.

$$\varphi_{\min} = (90^\circ - \Phi) - 23^\circ \quad (1)$$

$$\varphi_{\min} = (90^\circ - 22.1435^\circ) - 23^\circ = 44.856^\circ$$

$$d_{min} = L \cos(\beta) + \frac{L \sin(\beta)}{\tan(\varphi_{min})} \quad (2)$$

Donde:

- $\varphi_{min}$  Altura solar mínima al mediodía solar
- $\Phi$  Latitud del lugar de la instalación
- $d_{min}$  Distancia mínima entre módulos fotovoltaicos
- $L$  Longitud de los módulos
- $\beta$  Ángulo de inclinación de los módulos

De la ecuación 2 y utilizando los datos físicos del módulos fotovoltaico se calcula la distancia mínima  $d_{min}$ .

$$d_{min} = 99 \cos(20^\circ) + \frac{99 \sin(20^\circ)}{\tan(44.856^\circ)} = 127 \text{ cm}$$

Con esta distancia se realiza un primer acomodo de los módulos fotovoltaicos (figura 5). Considerando los resultados se procede a realizar un acomodo de los 96 módulos fotovoltaicos en un área disponible de 229.5 m<sup>2</sup>, donde el resultado óptimo para aprovechar el área de instalación es de 6 filas de 16 módulos cada una (figura 6).

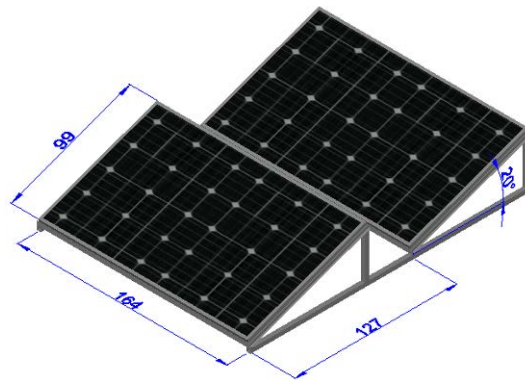


Figura 5 Vista isométrica acotada en centímetros.

## Pérdidas eléctricas debidas al cableado de la instalación

En la instalación de los sistemas fotovoltaicos es necesario considerar las pérdidas que se generan debido al cableado para la interconexión de los módulos



fotovoltaicos y la carga, esto se debe a la resistencia eléctrica propia del conductor, ya que el tipo de corriente que se maneja es primordialmente corriente continua.

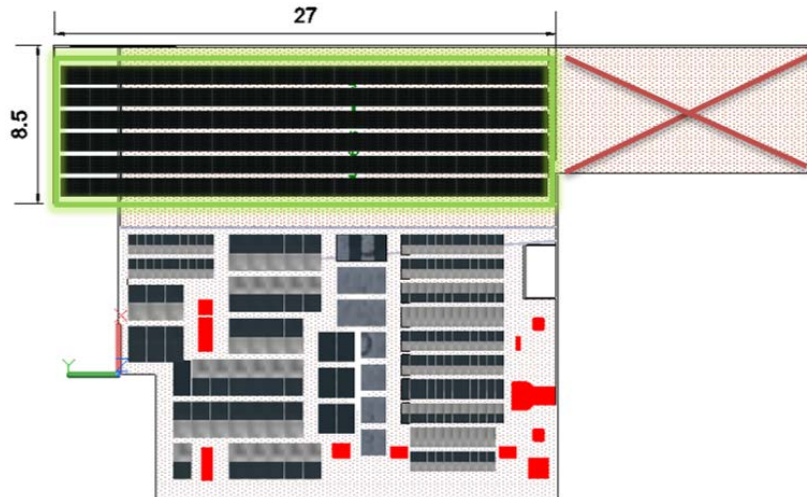


Figura 6 Vista superior donde se muestra el área de instalación acotada en metros.

Puede existir una componente de alterna de alta frecuencia asociada a la conmutación del convertidor CD/CA (inversor), pero se suelen emplear condensadores en terminales del inversor para minimizar esta componente. El siguiente análisis se hace considerando la operación bajo condiciones nominales del sistema (tabla 1), y ecuación 3 y 4.

$$R_0 = \rho \left( \frac{L}{S} \right) \quad (3)$$

$$R_f = R_0 * (1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

Donde:

$R_0$  Resistencia del conductor para una temperatura de 20°C

$\rho$  Resistividad del cobre  $\left( 0.01785 \frac{\Omega \cdot m \cdot m^2}{m} \right)$

$L$  Longitud del cable

$S$  Área transversal del conductor

$R_f$  Resistencia del conductor sometida a un cambio de temperatura debido a la operación del sistema

$\alpha$  Coeficiente de temperatura del cobre  $(3.9 \times 10^{-3} / ^\circ C)$

$\Delta T$  Cambio de temperatura del conductor

A partir de la corriente nominal de cada módulo fotovoltaico, y considerando un cambio un incremento de temperatura de hasta 60 °C, (temperatura de operación del sistema), a partir de ecuaciones 3 y 4, se tienen los datos mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Resistencia del conductor propio del módulo fotovoltaico.

Calibre AWG	Resistencia a 20 °C $\left(\frac{\Omega}{m}\right) R_0$	Ampacidad para una temperatura ambiente de 30 °C (A)	Resistencia a 60 °C $\left(\frac{\Omega}{m}\right) R_f$
12	0.005397641	25	0.006239673

**Cálculo de pérdidas debidas al conductor del módulo fotovoltaico**

Considerando una tensión máxima diferencial máxima respecto a tierra de  $V_{max} = 1000 V$  (Ver tabla 1), las pérdidas y caídas de tensión debido a los conductores que vienen predeterminados en los módulos fotovoltaicos para la instalación estarán dadas por ecuación 5 y 6.

$$P_{pérdidas} = I_{nom}^2 R_{0,f} \tag{5}$$

$$\Delta V = I_{nom} R_{0,f} \tag{6}$$

Donde:

$P_{pérdidas}$  Pérdidas eléctricas por efecto Joule en  $\left(\frac{W}{m}\right)$

$I_{nom}$  Corriente nominal del módulo fotovoltaico (tabla 1)

$R_{0,f}$  Resistencia a temperatura ambiente de 20 °C y resistencia sometida a un cambio de temperatura debido a la operación del sistema.

$\Delta V$  Es la caída de tensión en  $\left(\frac{Volts}{m}\right)$

Debido a que la corriente máxima que circulará en una cadena es la misma que la corriente máxima de un módulo fotovoltaico (por la conexión serie), se toma  $I_{nom} = 8.08 A$ . Por otro lado, a partir de la tensión máxima diferencial de 1000 V que soporta el aislamiento eléctrico del módulo, el número máximo de módulos

fotovoltaicos que pueden estar conectados en una cadena es de 27, ya que el nivel máximo de tensión en cada módulo se presenta cuando no hay carga, siendo éste de 36.39 V (Ver tabla 1). De acuerdo al acomodo propuesto, se considera una longitud de cableado máximo de interconexión de hasta 192 m, más 20 metros de conductor para la conexión hacia el punto común de acoplamiento (figura 7). Por lo tanto, es posible estimar las pérdidas por cableado como se muestra en la tabla 4.

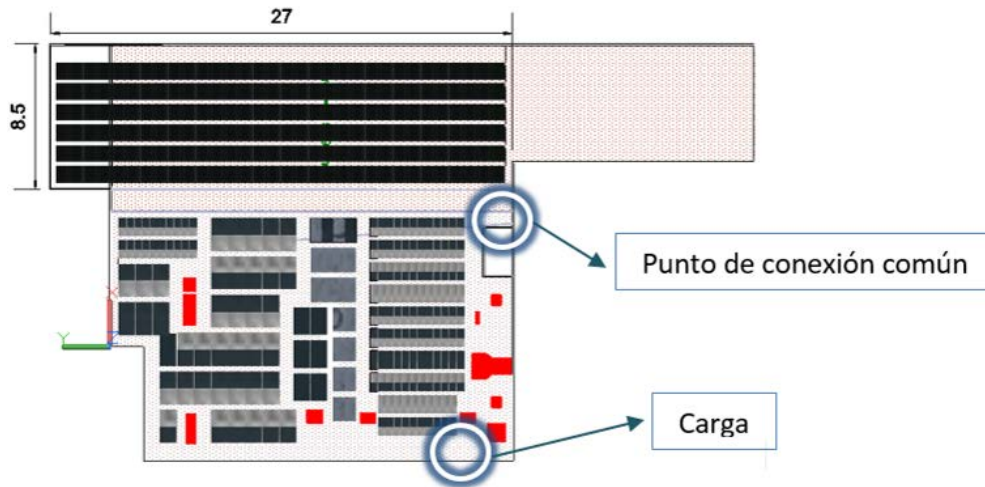


Figura 7 Punto de conexión común del sistema hacia la carga.

Tabla 4 Pérdidas en el conductor propio del módulo fotovoltaico.

Corriente (A)	Pérdidas $R_0$ (W)	Pérdidas $R_f$ (W)	$\Delta V_{R_f}$ (V)
8.06	74.23	85.8	10

### Cálculo de pérdidas debidas al conductor que va del punto de conexión común a la carga

Una vez estimadas las pérdidas generadas por el conductor propio del módulo, se comienzan con las consideraciones para generar un arreglo de módulos de módulos fotovoltaicos de forma que permitan parámetros de tensión, corriente y pérdidas adecuadas para el sistema; estas consideraciones están sujetas a estándares del conductor [8]. Considerando que la cantidad de módulos con los que se cuenta es de 96, se puede obtener a partir de los datos técnicos

del módulo fotovoltaico y de las ecuaciones (3-6) los datos de pérdidas, los cuales están resumidos en las tablas 5 y 6.

Tabla 5 Pérdidas por conducción de acuerdo al número de cadenas paralelo-serie.

Número de cadenas	Número de módulos fotovoltaicos en cadena	Nivel de Tensión (V)	Nivel de corriente (A)	Calibre del conductor AWG	Sección transversal del conductor mm <sup>2</sup>	Ampacidad del conductor para una temperatura ambiente de 30°C(A)	Resistencia del conductor a 20 °C (Ohms/m)	Resistencia del conductor a 60 °C (Ohms/m)	Pérdidas en Watts/m T=20 °C	Pérdidas en Watts/m T=60 °C
3	32	991.6	24.18	12	3.307	25	0.00540	0.00624	3.15585	3.64816
4	24	743.7	32.24	8	8.367	40	0.00213	0.00247	2.21747	2.56340
6	16	495.8	48.36	6	13.3	60	0.00134	0.00155	3.13877	3.62842
8	12	371.8	64.48	2	33.62	65	0.00053	0.00061	2.20745	2.55181
12	8	247.9	96.72	1	42.41	120	0.00042	0.00049	3.93734	4.55156
16	6	185.9	128.96	2/0	67.43	160	0.00026	0.00031	4.40246	5.08924
24	4	123.9	193.44	4/0	107.2	215	0.00017	0.00019	6.23069	7.20268

Tabla 6 Caída de Tensión considerando el número de cadenas.

Número de cadenas	Caída de tensión (ΔV) (V/m) para T=20 °C	Caída de tensión (ΔV) (V/m) para T=60 °C
3	0.13051497	0.150875303
4	0.06878021	0.07950992
6	0.06490421	0.075029267
8	0.03423462	0.039575223
12	0.04070861	0.047059149
16	0.03413816	0.039463711
24	0.03220993	0.037234674

Analizando los datos anteriores es posible generar las siguientes gráficas de pérdidas y caída de tensión, como se muestra en las figuras 8 y 9.

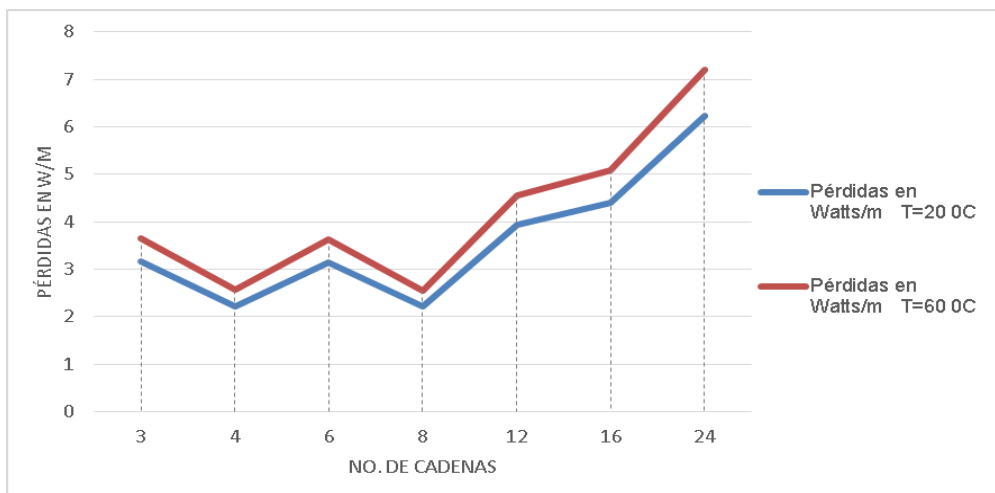


Figura 8 Pérdidas en el conductor en función del número de cadenas (W/m).

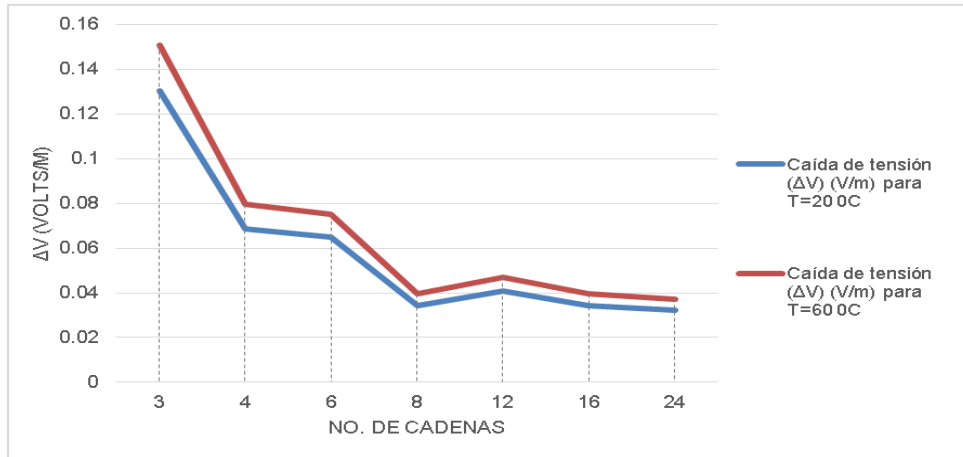


Figura 9 Caída de Tensión en los conductores en función del número de cadenas (V/m).

### 3. Resultados

Observando las figuras 8 y 9 se puede apreciar que en el arreglo de 8 módulos con 12 módulos fotovoltaicos en serie es el que brinda una caída de tensión y pérdidas menores a la de los otros arreglos. A partir de esta definición, se procede al diseño de la estructura en base a aluminio, para dar el soporte mecánico a la distribución de módulos propuesta, como se aprecia en la figura 10.

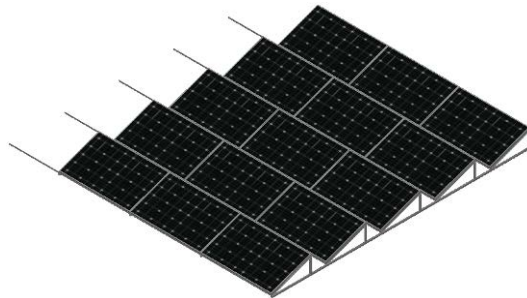


Figura 10 Vista isométrica del acomodo para los módulos fotovoltaicos.

Con el esquema de distribución y el diseño de la estructura, se procede al montaje de la plataforma física. La estructura fue diseñada en aluminio, con un montaje rígido pero de poco peso. En la figura 11 se muestra una vista del ensamble de los soportes de aluminio.

Después de la construcción de la estructura, se procede al montaje de los paneles solares. En la figura 12 se muestra el ensamble completo de la estructura y paneles solares. Las conexiones eléctricas están por la parte trasera de los paneles, lo que las protege parcialmente de exposición al sol y agua.



Figura 11 Vista de ensamble de la estructura de aluminio para el soporte de los paneles.



Figura 12 Montaje de los paneles solares.

#### **4. Conclusiones**

La planificación en la distribución de los módulos fotovoltaicos y su interconexión es crítica, desde el punto de vista de reducción de pérdidas para incrementar la generación final de energía eléctrica. Las variaciones en generación pueden ser de niveles relativamente bajos (<1%), pero que en una operación de largo plazo resultan en pérdidas acumuladas crecientes. Al realizar una conexión superior a 27 módulos en serie, el nivel de tensión puede llegar a considerarse como crítico, pues la operación en circuito abierto genera un nivel de tensión global próximo a 1000 V, que es el máximo permitido por el estándar y las hojas de datos en términos de aislamiento. Sin embargo, podría en un futuro

contemplarse el análisis para el uso de una protección que garantice la correcta operación del sistema. Por otro lado, dada la longitud de cableado, y con la finalidad de reducir las pérdidas de conducción, se puede proponer una instalación con un conductor de acometida de calibre superior al mínimo necesario, con el objetivo de maximizar la transferencia de potencia entre las celdas solares y la aplicación, reduciendo las pérdidas.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] Prospectiva de Energías Renovables 2015 – 2029. Secretaría de Energía, 2015. Pág 50.
- [2] R. Mayfield, *Photovoltaic Design & Installation For DUMMIES*. 1ª Ed. 2010. Wiley Publishing, Inc. Indianápolis, Indiana. Pág. 47-56, 70-78, 85-98.
- [3] F. C. Loaeza Salcedo, C. R. Carmona, J. C. Tenorio Caselin. Metodología de un sistema fotovoltaico conectado a la red (SFCR) para uso de luminarias del edificio 3 de la ESIME Zacatecana. I.P.N. 2012. México D.F. Pág. 4, 25-34, 51-59.
- [4] Cooperación técnica México-Japón. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/presentacion1.pdf>. Junio 2016.
- [5] Ficha técnica. <http://stores.erdm-solar.com/content/Fichas%20Tecnicas/ficha%20tecnica%20225-255%20poli.pdf>. Abril 2016.
- [6] NASA Surface meteorology and Solar Energy – Location. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>. Febrero del 2016.
- [7] Dom calculadora de posición - Azimut y Zenith. <http://solartopo.com/orbita-solar.htm>. Junio del 2016.
- [8] Manual Eléctrico. Conductores Monterrey S.A. de C.V. México. 2011.
- [9] Conductor Sizing and the National Electrical Code. <http://www.mjjobee.com/projects&news/NEC%20Art%20310.15.pdf>. Junio del 2016.

## 6. Autores

Fernando Isidoro Quiroz Vázquez, estudiante de Ingeniería en Electricidad y Automatización en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Juan Alejandro González Rivera, estudiante de Ingeniería en Electricidad y Automatización en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Ing. Juan Carlos Coronado, ingeniero en Electricidad y Automatización por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 2016.

Dr. Víctor Manuel Cárdenas Galindo, obtuvo su título de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica con especialidad en Filtros Activos Híbridos para Compensación Armónica de Corriente y Corrección de Factor de Potencia en Sistemas Trifásicos, por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 1999.

Lic. Ana Cecilia Rivera Rivera Licenciado en Electrónica Instrumentista por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 1992.



# **EVALUACIÓN DE UNA PLATAFORMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA CONTROL DE VELOCIDAD DE MÁQUINAS DE CD DE IMANES PERMANENTES**

## ***José Jiménez González***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*joseph31.ja@gmail.com*

## ***Felipe de Jesús González Montañez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*felipegonzalezmon@gmail.com*

## ***Francisco Beltrán Carbajal***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*fran\_belt29@hotmail.com*

## ***Irvin López García***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*irvinlopez@yahoo.com*

## ***Eduardo Campero Littlewood***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ecl@correo.azc.uam.mx*

## ***José Luis Hernández Ávila***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*joeluish@gmail.com*

## **Resumen**

Este trabajo presenta el diseño y construcción de una plataforma experimental para realizar adquisición de variables eléctricas y su aplicación en el control de una máquina de CD de imanes permanentes utilizando MATLAB®. La plataforma está formada por dos prototipos, uno destinado a realizar adquisición de datos y otro destinado a funcionar como un actuador en un sistema de control. El

prototipo de adquisición de datos consiste en sensores de voltaje y corriente y sus respectivos circuitos de acondicionamiento. El prototipo actuador para control consiste básicamente en un generador de PWM acoplado a un transistor de potencia que puede también recibir señales externas. Finalmente, se presenta la evaluación de ambos prototipos durante un esquema de control de velocidad de una máquina de CD de imanes permanentes utilizando la plataforma xPC Target de MATLAB®.

**Palabra(s) Clave(s):** Adquisición de datos, control de máquinas eléctricas, electrónica de potencia.

## 1. Introducción

El control de máquinas eléctricas representa un área de investigación y de desarrollo tecnológico muy activa y que sigue ofreciendo grandes retos en el diseño de esquemas de control que sean eficientes, robustos, fáciles de implementar y de bajo costo, debido al alto uso de este tipo de equipos en la industria y en los sectores doméstico y de entretenimiento, entre otros [1, 2, 3]. Sin embargo, para lograr altos niveles de desempeño, como eficiencia energética y robustez ante perturbaciones, es necesario monitorear adecuadamente todas las variables involucradas en el sistema que se está analizando. Esto se puede lograr con un sistema de adquisición de datos (SAD) eficiente y con un esquema de control robusto y confiable [4, 5]. Estas dos características se presentan de manera experimental en este trabajo, en el que se propone un esquema de control de velocidad para una máquina de CD de imanes permanentes y se evalúa a través de una plataforma experimental desarrollada en el Laboratorio LAPLACE de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Las mediciones las realizan sensores de voltaje, corriente y posición angular y pasan por una etapa de acondicionamiento para que puedan ser interpretadas correctamente por las tarjetas de adquisición de datos. Nos referiremos a este prototipo de adquisición de datos como MVE (Medidor de Variables Eléctricas). Con base en las mediciones realizadas por el MVE se genera una señal de control en forma de pulso de ancho variable PWM que es enviado al actuador,

que consiste en un optoaislador acoplado a un transistor de potencia que conmuta las terminales de una fuente de CD con las terminales de la máquina, y de esta manera se cierra el lazo de control. Nos referiremos a este prototipo actuador como CV (Controlador de Velocidad).

Este trabajo está estructurado de la siguiente manera: la segunda sección presenta el diseño y la construcción del MVE, así como de su comunicación con la plataforma xPC Target de MATLAB® y Simulink™, y el CV utilizado en la retroalimentación del control; la tercera sección habla sobre la máquina de CD de imanes permanentes y se propone el esquema de control; la cuarta sección incluye los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y finalmente la quinta sección corresponde a conclusiones.

## **2. Diseño y construcción de los prototipos experimentales**

Para realizar un control en lazo cerrado de una máquina de CD de imanes permanentes es necesario tener seguimiento de las variables eléctricas y mecánicas, así como un sistema de retroalimentación [6, 7]. Para cubrir el primero de estos requisitos se desarrolló un prototipo de adquisición de datos (MVE) y, para el segundo se desarrolló un prototipo actuador basado en un transistor de potencia (CV).

El MVE consiste en dos sensores de voltaje y dos sensores de corriente, junto con una etapa de acondicionamiento. La velocidad de la máquina de CD se mide indirectamente con un *encoder* incremental. El CV consta de tres etapas: generación PWM, aislamiento y potencia. La primera de estas se puede aislar del resto de los circuitos para evaluar el sistema de control con MATLAB®. El sensado de las variables involucradas en el prototipo se hace a través de tarjetas de adquisición de datos de la marca National Instruments™, que tienen alta compatibilidad con MATLAB®/Simulink™.

### **Medición de voltaje**

Para la medición de voltaje se utilizaron dos sensores de la marca LEM modelo LV25-P que funcionan utilizando el efecto Hall. Estos sensores pueden

medir con gran precisión  $\pm 500$  V, con una salida de aproximadamente  $\pm 0.8$  V, por lo que también se diseñó una etapa de amplificación y filtrado. Nos referiremos a los sensores de voltaje como  $SV_1$ ,  $SV_2$ , o  $SV_{1,2}$ . El sensor de voltaje utilizado se muestra en figura 1a.

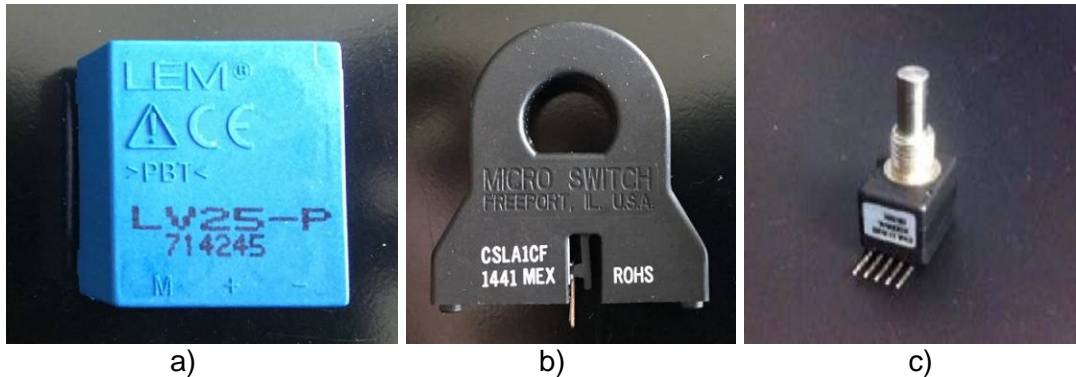


Figura 1 Sensor de voltaje, de corriente y *encoder* incremental utilizado en las pruebas.

### Medición de corriente

Para la medición de corriente eléctrica se utilizaron dos sensores Honeywell modelo CSLA1CF como el que se muestra en figura 1b. Este modelo consiste en un sensor de efecto Hall montado en el entrehierro de un núcleo ferromagnético con forma de anillo. El rango de medición de este sensor es de  $\pm 100$  A, por lo que resultan poco sensibles para las aplicaciones en las que se implementaron. La manera en que opera este sensor es la siguiente: se alimenta el sensor con un voltaje de 8 a 16 V, el conductor que lleva la corriente que se desea medir se hace pasar por el centro del núcleo y se mide un voltaje entre el pin de salida y la referencia de 0 V del sensor. El voltaje entregado a la salida del sensor tiene un *offset* de aproximadamente la mitad del voltaje de alimentación. En el caso del MVE se alimentaron estos sensores a 12 V, por lo que el voltaje entregado por el sensor es de aproximadamente 6 V, para corrientes del orden de  $\pm 2$  A. Una manera de incrementar la sensibilidad del sensor es hacer pasar  $N$  vueltas del conductor por el centro del anillo ferromagnético, sin embargo, hacer esto modifica el voltaje de salida. Las aplicaciones que requerirán este tipo de sensores no superan los 30 A, por lo que se devanaron 4 vueltas alrededor del

núcleo del sensor. De esta manera se aprovecha todo el rango de salida del sensor. Nos referiremos a los sensores de corriente como  $SC_1$ ,  $SC_2$ , o  $SC_{1,2}$ .

### **Medición de posición angular**

Para la medición de velocidad se utilizó un *encoder* incremental (EI) acoplado a la flecha de la máquina de CD. Un EI es un dispositivo electromecánico capaz de convertir la posición angular de un eje en una señal digital. El *encoder* utilizado es de la marca BOURNS, modelo ENA1J-B28-R00064L con sistema de codificador de cuadratura, que permite determinar el sentido de giro y se muestra en la figura 1c.

Para acoplar el EI a la máquina de CD se fabricó una pieza de aluminio de manera que se pudiera atornillar al eje de la máquina y asegurarlo por medio de un tornillo prisionero.

Para la medición de la velocidad en el modelo de Simulink™, se deriva la señal de la posición que se obtiene del EI y se hace pasar por un filtro pasa bajas. Este filtro es utilizado debido a que la función de posición que se obtiene no es una onda suave y por lo tanto la derivada de dicha función da como resultado otra función con una gran cantidad de componentes espectrales, lo que hace difícil ver la función de velocidad para fines prácticos. Las salidas del EI corresponden a los dos sensores del sistema de cuadratura, y se conectan a la tarjeta de adquisición de datos PCI-6602 en entradas analógicas.

### **Circuitos de acondicionamiento**

El MVE se diseñó para realizar distintas pruebas, no sólo las presentadas en este trabajo. El voltaje máximo que se pretende medir con este prototipo corresponde a un voltaje trifásico, cuyo valor máximo es de aproximadamente 311 V. De acuerdo con la caracterización de los sensores de voltaje, se puede asumir que al medir voltajes trifásicos la salida del sensor es de 1.4 V. Para aprovechar el rango completo de la tarjeta de adquisición de datos se diseñó un circuito amplificador con una ganancia  $G \approx 5.7$  y el voltaje máximo entregado a la

tarjeta de datos de aproximado de 7.98 V. Para ello, se utilizó un amplificador operacional configurado como amplificador no inversor [8] (figura 2a).

Para disminuir el ruido de las señales, se implementaron filtros RC de primer orden, que consisten en una resistencia en serie con la señal de entrada y un capacitor en paralelo. Como se observa en la figura 2b, la entrada al circuito de filtrado de los  $SV'_{1,2}$  es la señal que sale del circuito de amplificación. Por otro lado, la señal de entrada al filtro de corriente es la señal que entrega el sensor directamente, ya que los sensores de corriente no cuentan con etapa de amplificación (figura 2c). Los subíndices  $f$  indican que la señal del sensor correspondiente está filtrada.

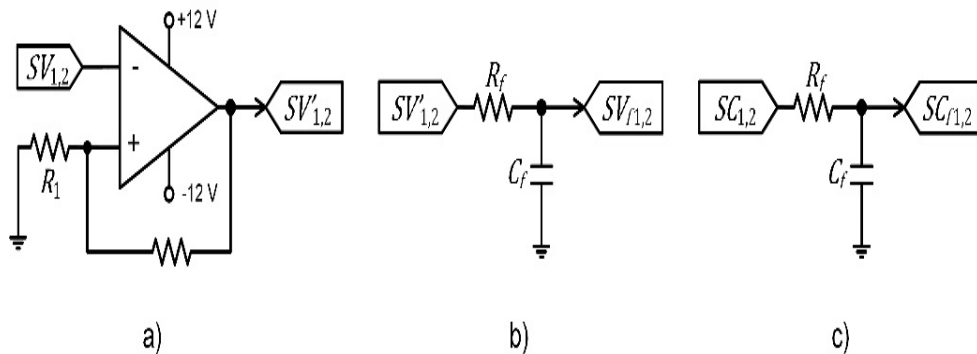


Figura 2 Circuitos de acondicionamiento.

Los filtros se diseñaron de tal manera que se redujera significativamente el ruido de medición de los sensores, sin modificar notablemente la dinámica de las variables medidas [8]. Se probaron distintos filtros de primer orden para seleccionar el adecuado para cada sensor. En la tabla 1 se muestran las frecuencias de corte de los filtros de cada sensor.

Una vez armados los circuitos de acondicionamiento se realizó la caracterización de las señales de voltaje y corriente. Se aplicaron voltajes y corrientes conocidos a los sensores y se midieron los valores de salida. Posteriormente se realizó un ajuste lineal de los valores experimentales utilizando la aplicación *Curve Fitting Tool* de MATLAB®. Los resultados de la caracterización sirven para conocer la relación entre el voltaje o corriente que se mide y los voltajes entregados por los

sensores. Esta relación se utiliza en los modelos de medición en tiempo real implementados con Simulink™.

Tabla 1 Frecuencias de corte de filtros conectados a los sensores de voltaje y corriente.

Señal	Frecuencia de corte $f$ [Hz]
$SV_1$	589.46
$SV_2$	430.15
$SC_1$	338.63
$SC_2$	338.63

Las señales acondicionadas de voltaje y salida se conectaron a las entradas analógicas de una tarjeta de adquisición de datos National Instruments™ PCI-6621 para ser interpretados por el sistema xPC Target. Todos los sensores y los circuitos de acondicionamiento se alimentaron con 12 V que proporcionó una fuente conmutada. El MVE armado se muestra en la figura 3.

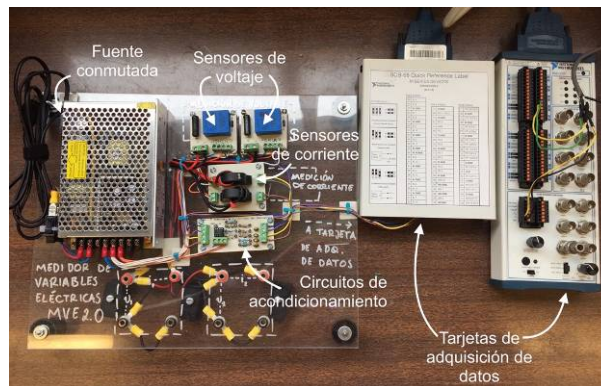


Figura 3 Medidor de variables eléctricas y tarjetas de adquisición de datos.

### xPC Target

El sistema xPC Target es un sistema operativo que permite desarrollar de manera rápida prototipos de control, realizar pruebas y adquirir datos en tiempo real utilizando una computadora estándar. En este trabajo se utilizaron dos computadoras; una *host* para realizar modelos de sistemas utilizando Simulink™ y generar el código correspondiente con el objetivo de cargarlos en la segunda computadora (*target*). El *target* contiene el *kernel* del sistema operativo xPC

Target y éste asigna todos los recursos del hardware con el que cuenta para ejecutar el código correspondiente del modelo de Simulink™ en tiempo real. Las salidas de los sensores de voltaje y corriente se conectaron, como ya se mencionó, a las entradas analógicas de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments™ modelo PCI-6621; por otro lado, el *encoder* se conectó a una entrada digital de la tarjeta también de la compañía NI modelo PCI-6602 (ver figura 3). Estas tarjetas están conectadas al *target*.

### Control de Velocidad

El dispositivo actuador para variar la velocidad del motor de CD consiste en un transistor de potencia MOSFET de la marca NTE modelo 2987 cuya compuerta (*gate*) está conectada a un pulso PWM. Este pulso puede ser generado por un oscilador interno o por el xPC, la selección de alguna de estas entradas se puede hacer utilizando un interruptor con dos tiros y dos polos. El PWM interno se utilizó únicamente con el fin de verificar el correcto funcionamiento del circuito de potencia. El PWM se conecta a un optoaislador de la marca Texas Instruments con modelo 6N136 (figura 4a), con el objetivo de no dañar la tarjeta de adquisición de datos en caso de que exista una falla en la etapa de potencia [9]. Los pines de *drain* y *source* del MOSFET están conectados a una fuente de CD y a la máquina de CD, respectivamente. El diagrama de este circuito de potencia se muestra en la figura 4b. Adicionalmente, en paralelo con la armadura de la máquina se conecta un diodo de libre circulación para permitir el paso de corriente en la máquina cuando el transistor está en *off*. La figura 5 muestra el prototipo de CV armado.

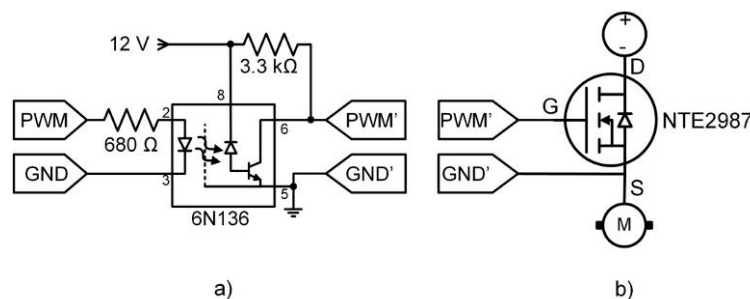


Figura 4 Circuito de potencia para el control de velocidad.



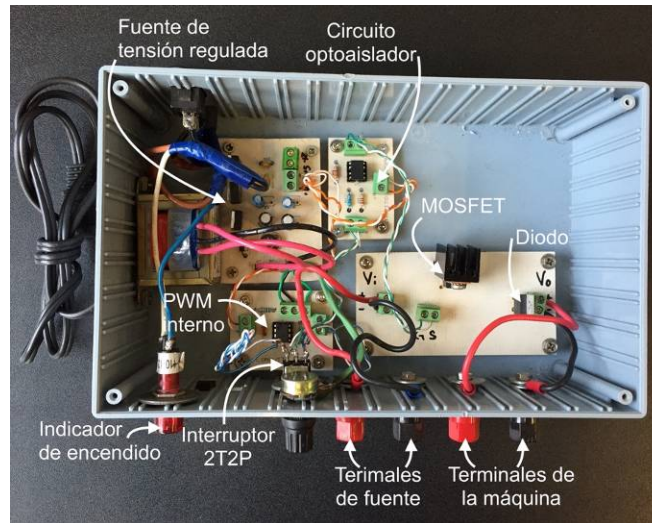


Figura 5 Prototipo de control de velocidad.

### 3. Máquina de CD de imanes permanentes

Una máquina de CD de imanes permanentes es un dispositivo de conversión de energía electromecánica. Consta de dos partes principales: estator (campo) y rotor (armadura) [10]. El campo necesario para realizar el acoplamiento entre el sistema eléctrico (devanados en el rotor) y mecánico (flecha) es generado por imanes permanentes colocados en el estator y magnetizados radialmente [11]. Una máquina de CD, como cualquier máquina eléctrica, puede funcionar como generador y como motor. Actualmente, este tipo de máquinas son muy utilizados en distintos campos industriales debido a que son económicas y muy fáciles de controlar. En este trabajo se realizaron pruebas en una máquina de CD de imanes permanentes cuyos valores nominales se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Valores nominales de la máquina de CD.

Voltaje de armadura $v_z$ [V]	90
Corriente de armadura $i$ [A]	7.5
Potencia $P_o$ [HP]	0.75
Velocidad $n$ [rpm]	2500

El comportamiento dinámico de las máquinas de imanes permanentes está dado por las ecuaciones 1 y 2 [7, 12]:

$$v_t = Ri + L \frac{di}{dt} + k \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

$$ki = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + \tau_L \quad (2)$$

La ecuación 1 representa el circuito eléctrico de la máquina y la ecuación 2 representa la ecuación dinámica para movimientos rotatorios del rotor, donde  $v_t$  es el voltaje en terminales,  $i$  es la corriente de armadura,  $\theta$  es la posición angular del rotor y  $\tau_L$  es el par de carga de la máquina. Los parámetros del modelo son la resistencia de armadura  $R$ , la inductancia de armadura  $L$ , la constante de fuerza contraelectromotriz o constante de par  $k$ , el momento de inercia de la armadura  $J$  y el coeficiente de amortiguamiento  $B$ . Este modelo es un sistema de ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. La mayor parte de los controladores requieren el conocimiento de estos parámetros, sin embargo, existen técnicas para estimarlos en caso de no ser conocidos [3, 13]. En este trabajo se realizaron pruebas con una máquina de CD de imanes permanentes de parámetros conocidos, mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de la máquina utilizada en las pruebas experimentales.

Resistencia de armadura $R$ [ $\Omega$ ]	1.27
Inductancia de armadura $L$ [mH]	28.44
Constante de fem $k$ [mVs/rad]	349.35
Momento de inercia $J$ [kgm <sup>2</sup> ]	$6.96 \times 10^{-3}$
Coefficiente de amortiguamiento $B$ [Nm/s]	$1.73 \times 10^{-3}$

Con este modelo matemático es posible proponer una estrategia de control de velocidad para la máquina funcionando como motor utilizando el voltaje en terminales como entrada de control [7, 4]. Para poder controlar la velocidad  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  de la máquina, se plantea un problema de seguimiento de trayectoria, dado por una velocidad deseada  $\omega^*$ . El MVE permite medir voltaje, corriente y posición angular, por lo que se propuso el controlador PID sencillo de

un solo lazo con seguimiento de una velocidad deseada descrito por la ecuación 3.

$$v_r = \frac{JL}{k} \left[ \frac{d^2 \omega^*}{dt^2} + Ri + k\omega - k_p e - k_i \int e dt - k_d \frac{de}{dt} \right] \quad (3)$$

Donde  $e = \omega - \omega^*$  es la señal de error de la velocidad de la máquina, y  $k_p$ ,  $k_i$  y  $k_d$  son las constantes de sintonización del PID.

Se utilizó la plataforma Simulink™ para poder desarrollar el sistema de control. Se configuró el MVE para medir el voltaje y la corriente de la fuente, así como el voltaje y la corriente de armadura de la máquina. La figura 6 muestra el diagrama de conexión utilizado en este experimento. Los bloques rojos corresponden a las mediciones eléctricas realizadas; se conectó un sensor de voltaje en paralelo con la fuente de alimentación y un sensor de corriente en serie con el *drain* del MOSFET. Se hizo un arreglo similar conectando un sensor de voltaje en paralelo con la armadura de la máquina y uno de corriente en serie. El bloque verde corresponde al control de velocidad descrito en la sección 2. El bloque violeta representa el circuito equivalente del MCDPM. El bloque azul claro representa el acoplado a la flecha del motor. La parte inferior de la figura 6 representa la conexión de las señales eléctricas medidas a la etapa de acondicionamiento y su conexión, junto con la señal del EI a las tarjetas de adquisición de datos y a la PC *target*. El PWM para el control de velocidad, se genera en el programa de Simulink™ y se transmite al CV a través de la tarjeta de adquisición de datos PCI-6602.

La figura 7 muestra la configuración del modelo de Simulink™ para adquisición de datos y control en tiempo real de la MCDPM. Este modelo se compila como una aplicación para que pueda ser descargada por el *target* y este pueda realizar las mediciones en tiempo real. En la figura 7, una vez más, los bloques en rojo corresponden a la adquisición de variables eléctricas y los bloques azul claro corresponden a la adquisición de posición angular. Adicionalmente, los bloques azul oscuro corresponden a la generación de la velocidad de referencias y sus derivadas indicadas en la ecuación (3). Los bloques en verde representan el sistema de control y la comunicación con la salida de PWM de la tarjeta de

adquisición de datos PCI-6602. Los bloques negros corresponden al manejo de las variables adquiridas y su almacenamiento.

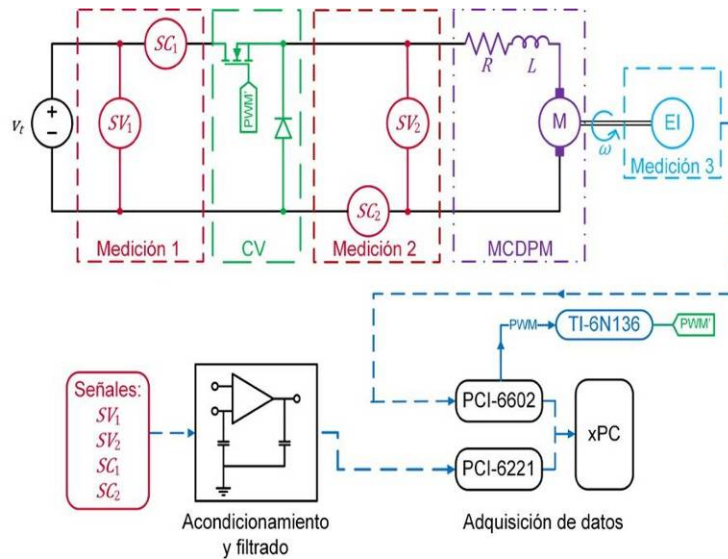


Figura 6 Conexión de la plataforma experimental para el control de la máquina.

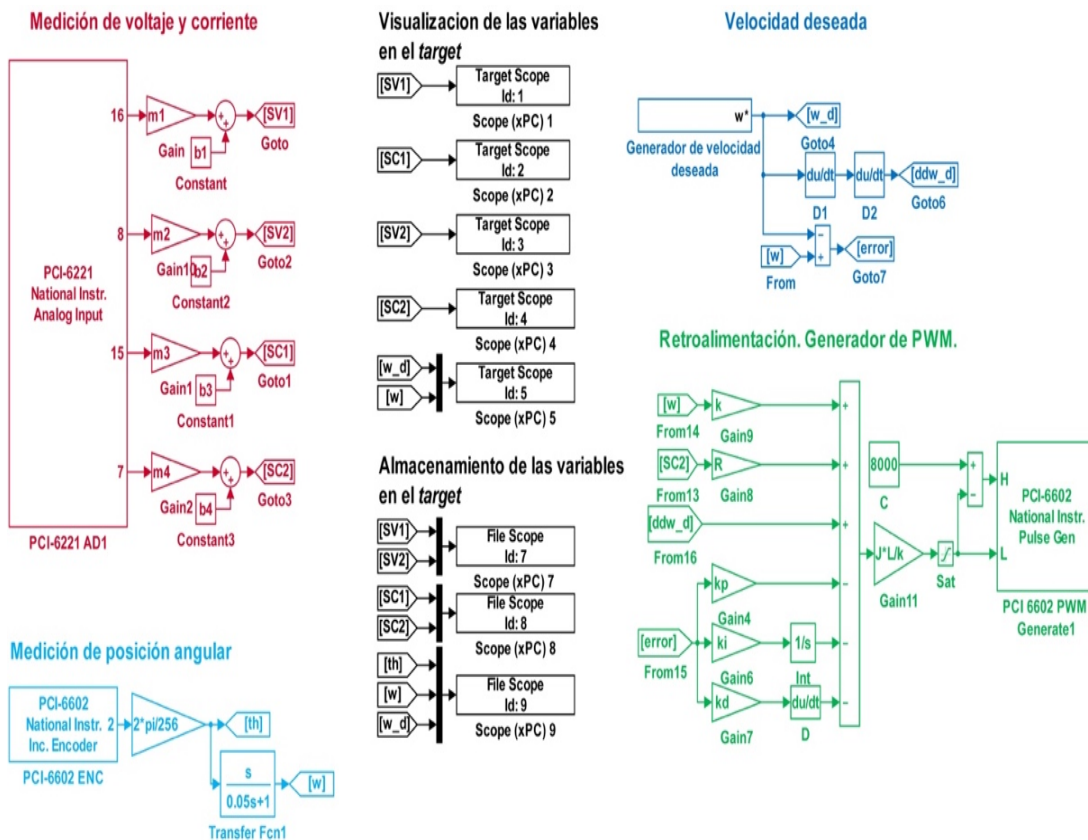


Figura 7 Modelo de Simulink™ para adquisición de datos y control.

El sistema de adquisición y control completamente acoplado se muestra en la figura 8.

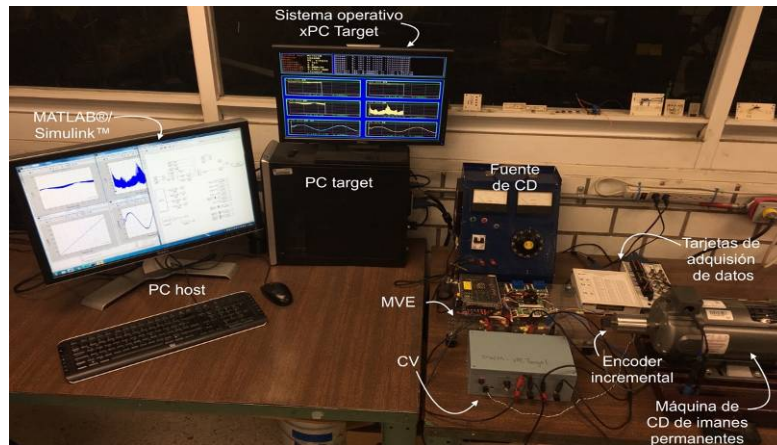


Figura 8 Plataforma de adquisición de datos y control de máquinas eléctricas.

#### 4. Resultados

Se conectó la máquina de CD al circuito de CV y al MVE. Se alimentó el motor a su tensión nominal y se probaron tres distintas velocidades de referencia para evaluar al controlador. Las velocidades propuestas fueron una función sinusoidal de 1 Hz, una señal diente de sierra de 0.5 Hz y una función arbitraria. Las dos primeras señales varían entre 220 y 240 rad/s.

Es importante mencionar que la acción del optoacoplador es de salida inversa, es decir, cuando recibe una entrada baja, su salida está en alto. Esto influyó en la condición inicial de la máquina, ya que al comienzo de las pruebas la máquina gira a aproximadamente 240 rad/s.

Los resultados de tres experimentos de 10 s se muestran en la figura 9. La figura 9a muestra los resultados de la comparación entre la velocidad sinusoidal de referencia y la velocidad medida. Se puede ver que la máquina sigue la trayectoria adecuadamente, y alcanza el estado estacionario en aproximadamente 0.34 s. En la parte inferior de esta figura se muestra la variación del error relativo entre las velocidades durante la prueba. En la figura 9b se muestra el seguimiento de una señal diente de sierra, en este caso, debido a que se sometió a la velocidad a un cambio más brusco la curva de error relativo

muestra picos significativos de hasta casi 10%, sin embargo, el tiempo para que la máquina vuelva a seguir la trayectoria es nuevamente de aproximadamente 0.34 s. Finalmente, se programó una trayectoria aleatoria con cambios relativamente suaves, mostrada en la figura 9c. Nuevamente, la velocidad alcanzó sus valores deseados en 0.34 s, y debido a que esta trayectoria fue la menos demandante, el error se mantuvo muy cercano a cero durante esta prueba.

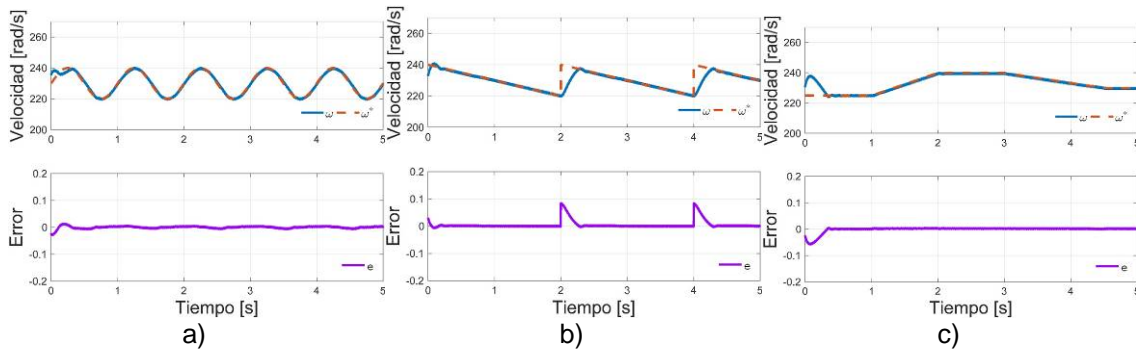


Figura 9 Resultados experimentales del sistema de control.

## 5. Conclusiones

Se desarrolló una plataforma de medición de variables eléctricas y un actuador basado en un transistor de potencia para la adquisición de datos y control en tiempo real de una máquina de CD de imanes permanentes de parámetros conocidos. Se propone un esquema de control de velocidad y se evalúa en un prototipo experimental para distintos seguimientos de trayectorias obteniéndose un tiempo de aproximadamente 0.34 s para alcanzar la trayectoria deseada y con errores menores al 2% en estado estacionario. Es evidente que la plataforma de adquisición de datos resulta muy útil en la implementación de sistemas de control, además, la caracterización de los sensores resulta ser un paso crucial para el correcto funcionamiento de estos sistemas retroalimentados.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] S. F. Alyaquout, P. Y. Papalambros, A. G. Ulsoy, "Combined robust design and robust control of an electric dc motor". IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 16. N° 3. 2011. Pp. 574-582.

- [2] C.-F. Caruntu, C. Lazar, "Robustly stabilising model predictive control design for networked control systems with an application to direct current motors". *Control Theory & Applications*, IET. Vol. 6. Nº 7. 2012. Pp. 943–952.
- [3] Z. Li, G. Chen, G. Zhang, M. Gan, "Adaptive robust control for dc motors with input saturation". *Control Theory & Applications*, IET. Vol. 5. Nº 16. 2011. Pp. 1895-1905.
- [4] K. Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*. 2003. Pearson Educación.
- [5] J. E. Osorio, J. D. P. Ramírez, M. A. Rodríguez, "Implementación de un sistema de adquisición de datos para monitorear una máquina de corriente directa". *Revista Tecnura*. Vol. 14. Nº 27. 2012. Pp. 60-68.
- [6] A. Hughes, B. Drury, *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. 2013. Newnes.
- [7] F. Beltran-Carbajal, A. Favela-Contreras, A. Valderrabano-Gonzalez, J. C. Rosas-Caro, "Output feedback control for robust tracking of position trajectories for dc electric motors". *Electric Power Systems Research*. Vol. 107. 2014. Pp. 183–189.
- [8] R. L. Boylestad, L. Nashelsky, *Electronic devices and circuit theory*. 1999. Granite Hill Publishers.
- [9] D. W. Hart, *Introduction to power electronics*. 1997. Prentice Hall. New Jersey.
- [10] S. D. Umans, *Fitzgerald and Kingsley's Electric Machinery*. 2013. McGraw-Hill Higher Education.
- [11] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, S. Pekarek, *Analysis of electric machinery and drive systems*. 2013. John Wiley & Sons.
- [12] J. Jiménez-González, F. Beltran-Carbajal, F. J. González-Montañez, I. López-García, "On Model Parameter Estimation Methods of DC Electric Motors" *Pistas Educativas*. Nº 112. 2015. Pp. 43-60.
- [13] Fliess, C. Join, H. Sira-Ramirez, "Non-linear estimation is easy". *International Journal of Modelling, Identification and Control*. Vol. 4. Nº 1. 2008. Pp. 12–27.



## 7. Autores

José Jiménez González (Cd. De México). Ingeniero Electricista por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como auxiliar de investigación. Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

Felipe de Jesús González Montañez (Cd. De México). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Mecatrónica en el CINVESTAV unidad Zacatenco. Actualmente es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

Francisco Beltrán Carbajal (Cd. De México). Ingeniero Mecánico Electricista por el Instituto Tecnológico de Zacatepec. Obtuvo el doctorado en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Mecatrónica en el CINVESTAV-IPN de la Ciudad de México. Actualmente es Profesor-Investigador del Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Sus principales intereses son el control de vibraciones, máquinas rotatorias, mecatrónica y control automático de sistemas electrónicos y electromecánicos.

I. López García (Ixtaltepec, Oaxaca). Doctor en Ingeniería, con especialidad en control por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) e Ingeniero Electricista con especialidad en Máquinas Eléctricas por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana en 2006, donde ha impartido diversas asignaturas a nivel licenciatura y asesorado distintos Proyectos de Integración. Cuenta con el reconocimiento de perfil *PRODEP* y es candidato al Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Sus áreas de interés en investigación son análisis, diseño y control de máquinas eléctricas aplicadas a fuentes alternativas en la generación de energía eléctrica.

E. Campero-Littlewood (México D.F.). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista otorgado por la Universidad Nacional Autónoma de México



(UNAM). Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (con especialidad en máquinas eléctricas y sistemas de potencia), por el Imperial College of Science and Technology, de la Universidad de Londres, Inglaterra, en enero de 1977. Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) en enero de 1977, donde es Profesor Titular "C" de tiempo completo. Ha ocupado diversos cargos dentro de la institución de los cuales destacan Jefe de departamento de Energía en el periodo 1980-1984 y Director de División de Ciencias Básicas e Ingeniería en el periodo 2000-2004. Ha impulsado diversos programas de impacto en el ahorro de la energía eléctrica dentro de la misma universidad. Sus áreas de interés en investigación son análisis y diseño de máquinas eléctricas, el ahorro y aprovechamiento de la energía.

J. L. Hernández-Ávila (México DF 1965). Es profesor titular nivel C, tiempo completo en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) Nivel II (2014-2018). Ingeniero Electricista por la UAM-A (1996). Doctor en Física por la Universidad Joseph Fourier-Grenoble I, Francia (1996).

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA DIAGNOSTICAR FALLAS DE CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES**

***Hiram Alberto Canseco García***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*hiramcanseco@gmail.com*

***Irvin López García***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ilg@correo.azc.uam.mx*

***Juan Carlos Olivares Galván***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*jolivare\_1999@yahoo.com*

***José Jiménez González***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*joseph31.ja@gmail.com*

***Felipe de Jesús González Montañez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*felipegonzalezmon@gmail.com*

***Rafael Escarela Pérez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*rescarela@gmail.com*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta el diseño y la construcción de un prototipo de adquisición de datos para detectar fallas de cortocircuito entre vueltas en devanados de un transformador monofásico tipo acorazado. Se detalla el proceso de construcción del prototipo, el cual se compone de tres etapas: medición, acondicionamiento y adquisición de datos. Se utilizó una placa Arduino Due para

la adquisición de datos, la cual se programó y se comunicó con MATLAB® para el procesamiento y análisis de las variables eléctricas adquiridas. Después, se monitorearon las variables eléctricas en el transformador mientras se provocaron fallas entre vueltas de sus devanados.

**Palabra(s) Clave(s):** Arduino, cortocircuito en transformadores, fallas en transformadores.

## 1. Introducción

Los transformadores eléctricos se consideran uno de los componentes más significativos de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Es por ello que la confiabilidad de los transformadores y otros componentes eléctricos es una importante consideración en el desempeño de estos sistemas. Para evaluar la confiabilidad de un SEP, es necesario tener en cuenta las condiciones de operación de los transformadores junto con la de los otros componentes eléctricos. Sin embargo, las fallas en los transformadores de potencia son casi inherentes y provocan considerables pérdidas financieras debido al corte de la energía eléctrica que pueden ocasionar y su costo de reparación o remplazo total [1-3].

Generalmente las fallas en los transformadores ocurren cuando alguno de sus componentes o estructura es incapaz de soportar el estrés producido por las fluctuaciones de la demanda energética [4]. Las fallas en transformadores ocurren en sus diferentes componentes, lo que permite dividirlos en categorías. La frecuencia con la que ocurren algunas fallas en los transformadores de potencia es la siguiente: 3% núcleo, 12% aisladores, 13% flujo disperso, 19% devanados, 41% cambiadores de toma y el 12% restante corresponde a otro tipo de fallas [5]. Por estas razones, resulta de gran interés diagnosticar la condición de operación de un transformador para conocer su estado físico. Para ello, es necesario monitorear variables como: voltajes, corrientes, temperatura y generación de gases disueltos en el aceite aislante [5-8]. El monitoreo de transformadores permite detectar fallas a tiempo y prevenir su fallo definitivo, evitando así pérdidas económicas [2, 3].

Actualmente existen distintos sistemas comerciales de adquisición de datos para el análisis de señales eléctricas, como son: DATAQ Instruments™, LabVolt®, National Instruments™, entre otros. Sin embargo, el elevado costo de estos sistemas es una gran limitante para su uso. Afortunadamente, en los últimos años tanto investigadores como estudiantes han desarrollado sistemas de adquisición de datos que son precisos y de bajo costo. Algunas aplicaciones de estos sistemas en la ingeniería eléctrica, particularmente con el transformador, son la medición de sus variables eléctricas y físicas para su monitoreo, diagnóstico y para ejecución pruebas estándares [9-12, 14].

Hoy en día, las placas Arduino son una herramienta muy poderosa en la elaboración de proyectos debido a que proporcionan tecnología de bajo costo, facilidad de uso y de adquirir en el mercado [14]. Arduino tiene una amplia variedad de aplicaciones en diferentes ramas de la ciencia para construir cosas, como son: instrumentos musicales, robots, esculturas de luz, video juegos, muebles interactivos, ropa inteligente, entre otras [15]. En proyectos relacionados con ingeniería eléctrica, las placas Arduino han sido utilizadas como medidor de energía en el hogar [16], para la corrección del factor de potencia [17], y en el control de motores eléctricos e iluminación [18]. De acuerdo con la sección de *Play Ground* de la página de Arduino [19], *Eficiencia Energética* es una propuesta de proyecto de nivel avanzado que consiste en la implementación de sensores para la medición de variables eléctricas y mediante la adquisición de datos almacenar la información.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de adquisición de datos utilizando una placa Arduino Due que toma las ideas principales del proyecto *Eficiencia Energética*. La función del prototipo es medir voltajes y corrientes en un transformador monofásico tipo acorazado de 120 VA mientras se le provocan fallas de cortocircuito [20].

## 2. Diseño y construcción del prototipo

La figura 1 muestra el esquema básico del prototipo de adquisición de datos. Las letras SV y SC hacen referencia a sensor de voltaje y sensor de corriente.

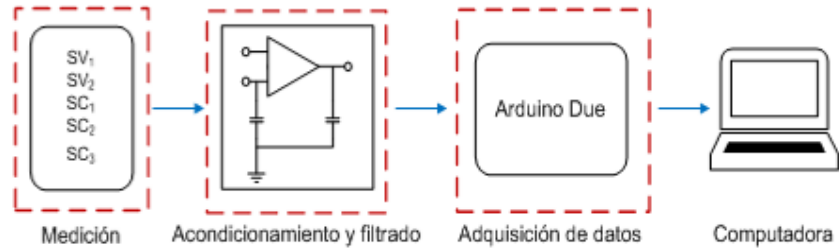


Figura 1 Esquema básico del prototipo de adquisición de datos.

## Medición de voltaje y corriente

La medición de voltaje en el prototipo de adquisición de datos se realizó utilizando 2 sensores de efecto Hall de a marca LEM modelo LV 25-P, mientras que la medición de corriente se realizó utilizando 3 sensores de efecto Hall de la marca *Honeywell* modelo CSLA1CF. Estos sensores junto con sus diagramas de conexión se muestran en la figura 2.

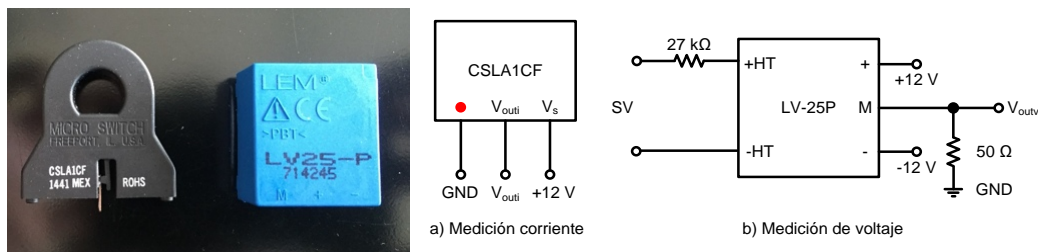


Figura 2 Sensor de corriente y de voltaje.

## Etapa de acondicionamiento y filtrado

La placa Arduino Due es capaz de medir voltajes entre 0 y 3.3 V. Cualquier valor fuera de este rango puede dañar severamente a la placa [9, 10]. La salida de los sensores de voltaje se encuentra en el orden de milli volts, mientras que los sensores de corriente tienen una salida entre 6 y 12 V. Por lo tanto, resulta necesario contar con una etapa que adecúe esos niveles de voltaje a los aceptados por la placa para no dañarla. La figura 3 muestra las conexiones de la etapa de acondicionamiento que se realizó con amplificadores operaciones LF412CN y la etapa de filtrado, que se diseñó para medir corrientes y voltajes a frecuencias no mayores a los 100 Hz siguiendo la topología de filtros RC. La tabla 1 muestra los parámetros de la etapa de acondicionamiento.

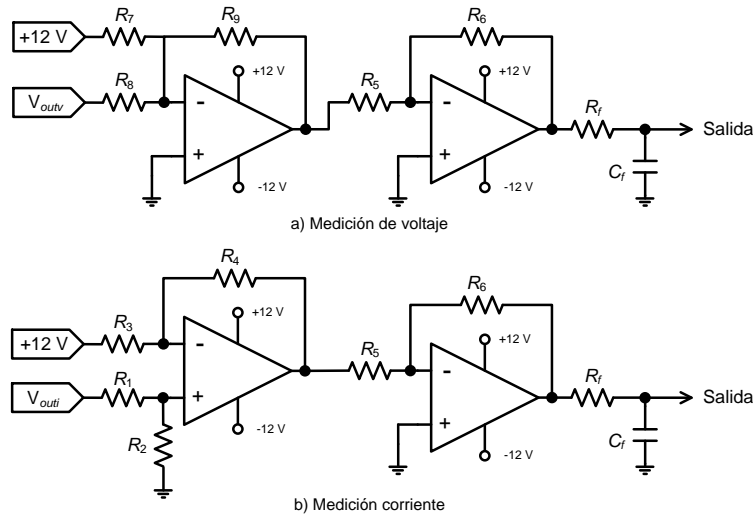


Figura 3 Conexiones de la etapa de acondicionamiento y filtrado.

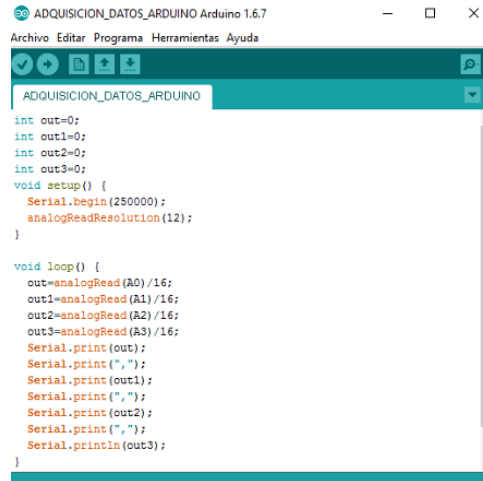
Tabla 1 Valores de los elementos de los circuitos de acondicionamiento y filtrado.

Parámetro	SV <sub>1</sub>	SV <sub>2</sub>	SC <sub>1</sub>	SC <sub>2</sub>	SC <sub>3</sub>
R <sub>1</sub> [kΩ]			8.71	8.81	11.99
R <sub>2</sub> [kΩ]			6.81	6.78	6.85
R <sub>3</sub> [kΩ]			20.01	19.78	19.84
R <sub>4</sub> [kΩ]			9.99	9.92	9.78
R <sub>5</sub> [kΩ]	3.22	4.63	9.94	9.98	10.01
R <sub>6</sub> [kΩ]	4.62	4.71	5.54	5.70	5.85
R <sub>7</sub> [kΩ]	6.58	3.49			
R <sub>8</sub> [kΩ]	4.29	0.96			
R <sub>9</sub> [kΩ]	4.64	4.69			
R <sub>f</sub> [kΩ]	32.62	32.78	32.54	32.70	32.71
C <sub>f</sub> [μF]	0.0110	0.0091	0.0100	0.0110	0.0100

### Adquisición de datos

Para digitalizar las señales analógicas de entrada y analizarlas a través de una computadora se utilizó la placa Arduino Due. La frecuencia de muestreo de la placa depende del número de canales utilizados. Para este trabajo se utilizaron tres canales y la frecuencia de muestreo para cada canal fue aproximadamente de 1.56 kHz. No obstante, al utilizar menos canales analógicos se podría tener una frecuencia de muestreo mayor. La programación de la placa Arduino Due se realizó por medio de un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés). La comunicación entre Arduino y la computadora se logró mediante la comunicación serie cuyo canal físico fue un cable USB. La figura 4 muestra el

código que se elaboró y se cargó en la placa Arduino Due. Básicamente, el código consiste en habilitar el puerto serial y realizar la adquisición de datos en 4 canales analógicos de tarjeta para posteriormente enviarlos al puerto serial.



```
ADQUISICION_DATOS_ARDUINO Arduino 1.6.7
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
ADQUISICION_DATOS_ARDUINO
int out=0;
int out1=0;
int out2=0;
int out3=0;
void setup() {
  Serial.begin(250000);
  analogReadResolution(12);
}
void loop() {
  out=analogRead(A0)/16;
  out1=analogRead(A1)/16;
  out2=analogRead(A2)/16;
  out3=analogRead(A3)/16;
  Serial.print(out);
  Serial.print(",");
  Serial.print(out1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(out2);
  Serial.print(",");
  Serial.println(out3);
}
```

Figura 4 Código de Arduino.

Sin embargo, éste código solo sirve para realizar la adquisición de datos sin almacenar la información. Para hacer frente a esta necesidad, fue necesario elaborar un código en MATLAB®:

```
%ADQUISICION DE DATOS UTILIZANDO MATLAB Y ARDUINO DUE
%ELABORADO POR: HIRAM ALBERTO CANSECO GARCIA
%SECCION A: CONFIGURACION DEL PUERTO SERIAL
delete(instrfind({'Port'},{'COM5'})); %Borrar
s = serial('COM5','BaudRate',256000,'Terminator','CR/LF'); %Crear el puerto serial
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead'); %Notificacion si el puerto serial
no se abre
fopen(s); %Abrir puerto
tmax=30; %Tiempo de captura en segundos
%SECCION B: INDICAR LA PRUEBA A REALIZAR
Prueba_a_realizar=1; %Prueba a realizar: (1)circuito abierto (2)
cortocircuito
%SECCION C: DECLARAR VECTORES
v1 = []; %Vector del sensor de voltaje 1
v2= []; %Vector del sensor de voltaje 2
i1 = []; %Vector del sensor de corriente 1
i2= []; %Vector del sensor de corriente 2
i3= []; %Vector del sensor de corriente 2
V_rms1=[]; %Vector del valor rms del sensor de voltaje 1
V_rms2=[]; %Vector del valor rms del sensor de voltaje 2
I_rms1=[]; %Vector del valor rms del sensor de corriente 1
```

```

I_rms2=[]; %Vector del valor rms del sensor de corriente 1
S=[]; %Vector de la potencia aparente
P=[]; %Vector de la potencia activa
Q=[]; %Vector de la potencia reactiva
P_ins=[]; %Vector de la potencia instantanea
V_s1=[]; %Vector temporal de voltaje
V_s2=[]; %Vector temporal de voltaje2
I_s1=[]; %Vector temporal de corriente
I_s2=[]; %Vector temporal de corriente
Muestras=[]; %Vector de muestras
i=1; %Contador 1
t=0; %Tiempo
h=1; %Contador 2: determina cada cuanto tiempo se
    hacen los calculos rms
k=1; %Contador 3: debe tener el valor inicial de h.
MP=26; %Numero de muestras por periodo
MP2=(k*MP)-1; %Constante 1: sirve para calcular el valor
    inicial de los vectores temporales
%SECCION 4: ADQUISICION DE DATOS
tic
while t<tmax
    a = fscanf(s,'%d,%d,%d,%d'); %Almacena los datos que recibe del
    puerto serial
    t = toc;
    v1(i)=(((a(1)*3.3/255)-1.418)/0.007258); %Caracterizacion SV1
    i1(i)=(((a(2)*3.3/255)-1.462)/0.04374); %Caracterizacion SC20
    v2(i)=((a(3)*3.3/255)-1.714)/0.02337; %Caracterizacion SV2, (Agregar
    comentario en prueba CC)
    i2(i)=(((a(3)*3.3/255)-1.597)/0.1454); %Caracterizacion SC4, (Quitar
    comentario en prueba CC)
    i3(i)=(((a(4)*3.3/255)-1.424)/0.006087); %Caracterizacion SC3
    T=i;
    Muestras(i)=T;
    if T==h*MP
        V_s1=v1(1,(MP*h-MP2):MP*h);
        V_s2=v2(1,(MP*h-MP2):MP*h); %Agregar comentario en prueba CC
        I_s1=i1(1,(MP*h-MP2):MP*h);
        %I_s2=i2(1,(MP*h-MP2):MP*h); %Quitar comentario en prueba CC
        I_s3=i3(1,(MP*h-MP2):MP*h);
        V_rms1(h)=rms(V_s1);
        V_rms2(h)=rms(V_s2); %Agregar comentario en prueba CC
        I_rms1(h)=rms(I_s1);
        %I_rms2(h)=rms(I_s2); %Quitar comentario en prueba CC
        I_rms3(h)=rms(I_s3);
        P_ins=V_s1.*I_s1;
        P(h)=mean(P_ins);
        h=h+(k*1);
        clear V_s1
        clear V_s2 %Agregar comentario en prueba CC
    
```



```
clear I_s1
%clear I_s2                                %Quitar comentario en prueba CC
    clear I_s3
    clear P_ins
end
    i = i+1;
end
clc;                                        %Limpia el comando
close all;                                %Cierra todas las figuras abiertas
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);    %Calcula el numero de
capturas por segundo
Muestras2=[1:1:(h-1)];                    %Calcula el numero calculos rms
Time=(t/i).*(Muestras);                    %Calcula el tiempo en que se tomo
cada muestra
Time_2=(MP*t/i).*Muestras2;                %Calcula el tiempo en que se
hizo calculos rms
S=V_rms1.*I_rms1;                           %Calcula la potencia S
Q=sqrt((S.^2)-(P.^2));                       %Calcula la potencia Q
```

Dicho código habilita el puerto serial para recibir la información adquirida por la tarjeta Arduino Due. Como se mencionó anteriormente, las únicas variables eléctricas medidas fueron voltajes y corrientes. Utilizando éstas variables, durante el proceso de adquisición (sección 4 del código), con el algoritmo implementado se calcularon cada 0.016 s los valores RMS de corriente y de voltaje, así como también la potencia aparente  $S$  y la potencia activa  $P$ .

### Fabricación de las tarjetas impresas y ensamblado del prototipo

Para la fabricación de las tarjetas correspondientes a los circuitos medición y acondicionamiento se utilizó el simulador de circuitos *Proteus 8 Professional*. En el software de *Proteus 8 Professional* se obtuvieron dos archivos en formato *Bitmap* que se imprimieron y plasmaron en las placas fenólicas mediante la aplicación de calor. La figura 5 muestra el ensamblado final de las tarjetas correspondientes a los circuitos medición y acondicionamiento.

En figura 5, las tarjetas mostradas son:

- a) Medición de voltaje.
- b) Acondicionamiento para medición de voltaje.
- c) Acondicionamiento para medición de corriente.
- d) Medición de corriente.

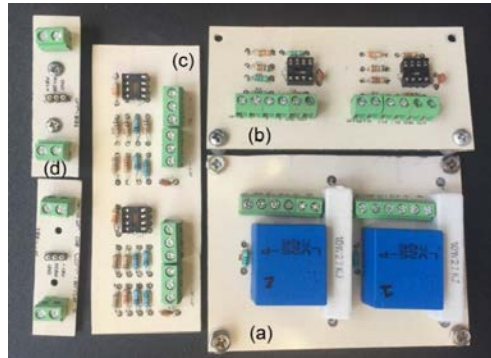
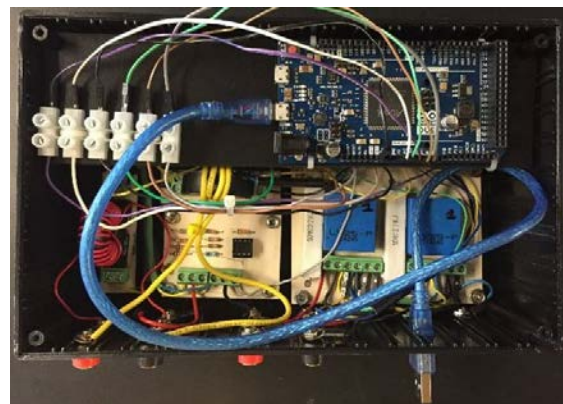


Figura 5 Ensamble final de tarjetas.

La figura 6a muestra la vista superior del prototipo de adquisición de datos en donde se puede observar la ubicación de las tarjetas de adquisición de datos correspondientes a la etapa de acondicionamiento y filtrado. Con el objetivo de aprovechar al máximo el espacio proporcionado por el gabinete, se acondicionó un segundo nivel donde se ubicó a la tarjeta Arduino Due, tal y como se muestra en la figura 6b.



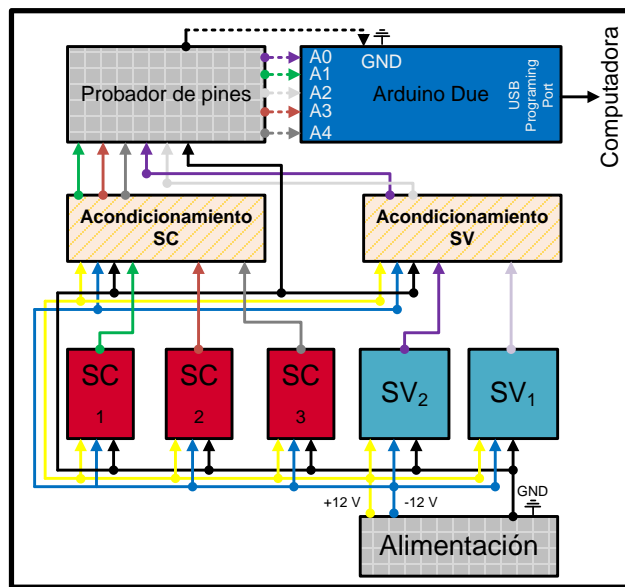
(a) Vista superior del prototipo



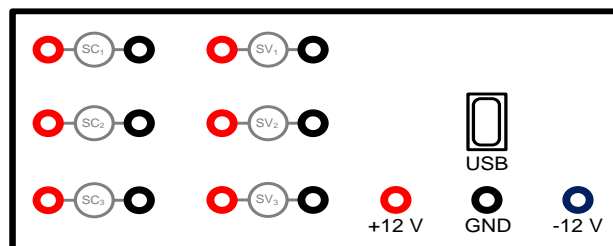
(b) Vista superior del prototipo con la Arduino Due

Figura 6 Ensamblado del prototipo de adquisición de datos.

El esquema de conexión del prototipo de adquisición de datos se muestra en la figura 7. Como se puede observar, las salidas de las etapas de acondicionamiento van a un probador de pines con el objetivo de corroborar que no exista ninguna anomalía en las conexiones antes de mandar las señales a la placa Arduino. En otras palabras, cuando las entradas a los sensores de voltaje y corriente son nulas, los voltajes en las salidas de las etapas de acondicionamiento están en un determinado valor que indica dicha condición. Evidentemente, este valor depende de las conexiones y elementos utilizados. Para éste trabajo, la tabla 2 especifica el significado de cada color del esquema de conexión y los voltajes aproximados que se deben tener en el probador de pines (PP).



(a) Esquema de conexiones internas del prototipo



(a) Esquema de vista frontal del prototipo

Figura 7 Esquemas de conexión del prototipo de adquisición de datos.

Tabla 2 Significado de cada color del esquema de conexión.

Color	Significado	Voltaje PP
Amarillo	12 V	12 V
Azul	-12 V	-12 V
Negro	GND	GND
Morado	SV1	1.420 V
Blanco	SV2	1.716 V
Verde	SC1	1.465 V
Café	SC2	1.583 V
Gris	SC3	1.425 V

Es importante mencionar que en la figura 7b se cuenta con 6 terminales destinadas a los sensores de voltaje. Finalmente, se recomienda utilizar el sensor de voltaje 1 (SV<sub>1</sub>) para medir voltajes cuyo valor RMS sea mayor a 45 V y el sensor de voltaje 2 (SV<sub>2</sub>) para voltajes cuyo valor RMS sea menor a 45 V, ya que la etapa de adaptación de ambos sensores se diseñó con el objetivo de tener buena precisión para diferentes niveles de voltajes.

### 3. Resultados

En esta sección se presentan las mediciones para una falla de cortocircuito entre 325 vueltas del devanado de alto voltaje (HV, por sus siglas en inglés) en un transformador monofásico de 120 VA operando en vacío. El transformador tiene 472 vueltas efectivas en el devanado de HV, por lo que la falla provocada en esta prueba corresponde al 69% del devanado. La prueba duró 30 s y la falla se provocó durante 4 intervalos de tiempo. Es importante mencionar que, durante las pruebas se tomaron mediciones de voltaje y corriente en el devanado de HV. En el devanado de bajo voltaje (LV, por sus siglas en inglés) sólo se tomaron mediciones de voltaje. Con estas mediciones y utilizando los algoritmos implementados en los códigos computacionales, se realizó el cálculo de potencia activa y reactiva, mismas que se presentan en las gráficas.

En la parte superior de la figura 8 se muestran las ondas de voltaje en HV y un acercamiento para ver a detalle lo que sucede durante los primeros instantes de falla. En la parte inferior, se muestran el valor RMS de voltaje y su acercamiento

para los primeros instantes de falla. Como se puede observar, en los instantes en que ocurre la primera falla, el HV disminuye de un valor RMS de 127 V a 108 V.

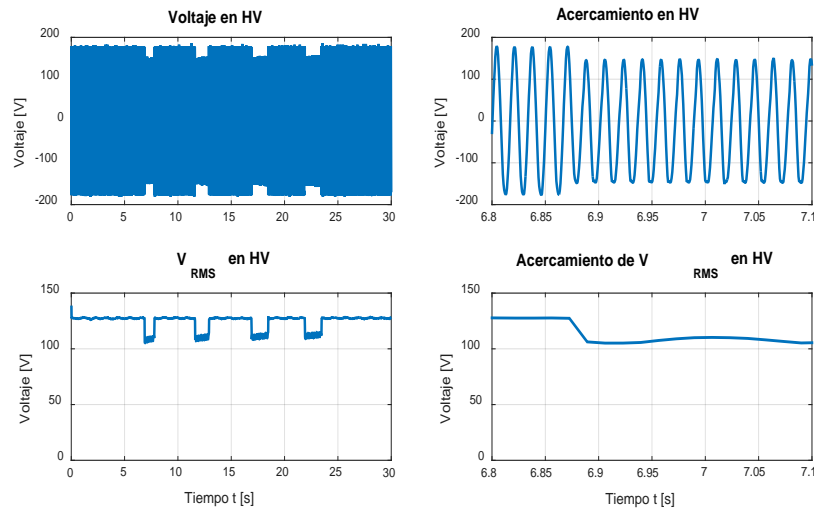


Figura 8 Voltaje en HV.

El voltaje en LV tiene un comportamiento similar al voltaje en HV. Se puede ver en la figura 9 que dicho voltaje disminuye, en los instantes que ocurre la primera falla, de un valor RMS de 24 V a 19 V.

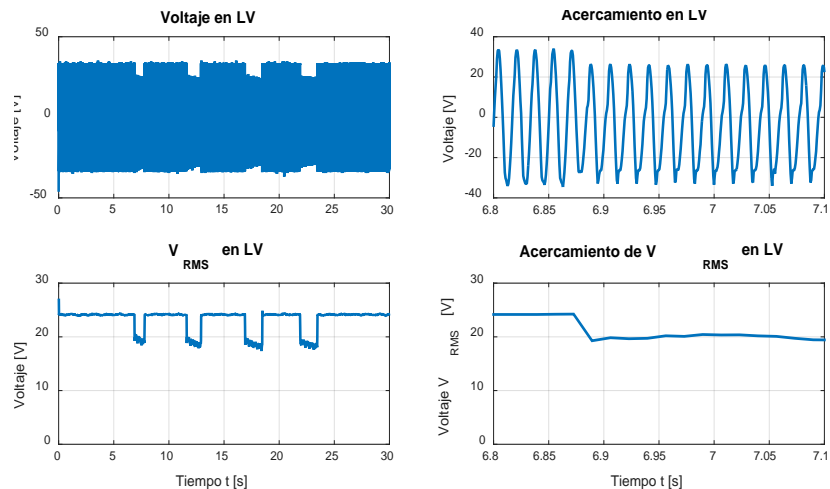


Figura 9 Voltaje en LV.

La parte superior de la figura 10 muestra las ondas de corriente en HV y su acercamiento en los primeros instantes de falla. El valor RMS de la corriente en HV se incrementa de 0.1 A a 20.7 A en el primer instante de falla. Finalmente, en

la figura 11 se observa que la potencia activa se incrementa de 7 W a 2031 W, mientras que la potencia reactiva se incrementa de 10 VAR a 516 VAR. Todo esto durante los primeros instantes posteriores a la falla.

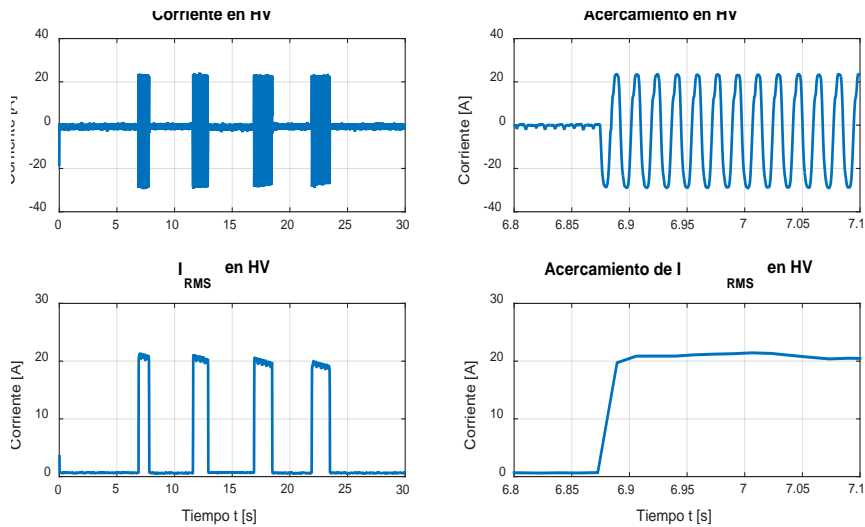


Figura 10 Corriente en HV.

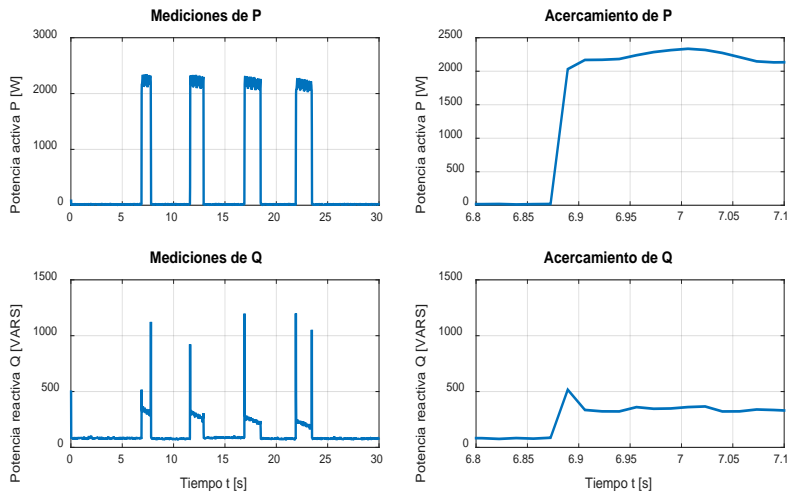


Figura 11 Mediciones de potencia.

#### 4. Discusión

En las primeras centésimas de segundo existen fluctuaciones en la forma de onda de las variables eléctricas adquiridas. Esto se debe a que al iniciar el proceso de comunicación entre el prototipo de adquisición de datos y la computadora, no se tiene la sincronización adecuada y causa errores de

medición. Después de aproximadamente 0.01 s, la comunicación es correcta y las mediciones se consideraron válidas. Sin embargo, estos errores se ven reflejados en los cálculos de los valores RMS. Debido a esto, en un principio las gráficas de los valores RMS van en ascenso o descenso hasta estabilizarse en aproximadamente 0.4 s. Todas las mediciones erróneas causadas por la comunicación transitoria no se atribuyeron a las fallas y tampoco se consideró como comportamiento del transformador en condiciones de operación sin falla. Es importante hacer notar que estos errores únicamente se presentaron al iniciar la comunicación, por lo tanto, todas las mediciones que se tomaron después de 0.01 s, se consideraron válidas. En la figura 12 se muestran las mediciones de voltaje durante los primeros 0.08 s, donde se aprecia mejor este error al iniciar la comunicación.

Las curvas presentadas presentan un comportamiento congruente con los resultados esperados. La corriente alcanza valores de hasta 20 en por unidad mientras se mantiene la falla. Estos valores son de tal magnitud debido a la severidad de la falla (69% de las vueltas totales en cortocircuito). El prototipo desarrollado permite monitorear las variables eléctricas del transformador, por lo que se pueden establecer algunos umbrales de corriente para conocer la severidad de las fallas, para distintos casos además del considerado en este trabajo.

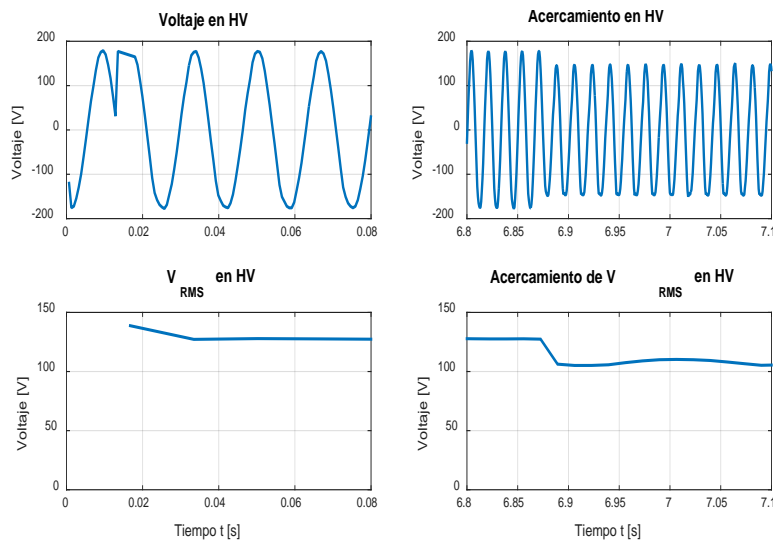


Figura 12 Mediciones de voltaje en los primeros 0.08 s.

## 5. Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo de adquisición de datos preciso, arquitectura abierta y portable. Utilizando el prototipo se implementó un monitoreo para detectar fallas de cortocircuito entre vueltas de devanados en un transformador monofásico tipo acorazado, Aunque podría utilizarse esta tecnología en otros tipos de transformadores. Sólo fue necesario medir voltajes y corrientes debido a que los algoritmos implementados en los códigos computacionales fueron capaces de realizar los cálculos de valores RMS de voltajes y corrientes, así como los cálculos de potencia; esto es ventajoso debido a que se pueden realizar las pruebas sin utilizar wáttmetros.

La placa Arduino Due funcionó adecuadamente para la medición de variables eléctricas en tiempo real y fue muy fácil de implementar. Sin embargo, desde el punto de vista de los autores, la principal desventaja radica en que su frecuencia de muestreo depende del número de canales analógicos utilizados. Por último, las fallas de cortocircuito entre vueltas en devanados de un transformador pueden ser detectadas al monitorear la corriente que fluye en ellos, debido a que, como lo muestran los resultados, es la variable del transformador que más se ve afectada por un cortocircuito. Este trabajo puede extenderse realizando más pruebas similares, de manera que se pueda caracterizar la corriente de falla en función del número de vueltas en cortocircuito y de esta manera poder diagnosticar la severidad de la falla en un transformador.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava, "Review of condition assessment of power transformers in service". *Electrical Insulation Magazine*, IEEE. Vol. 18. No 6. 2002. Pp. 12-25.
- [2] DING, Hongzhi, et al. *Why transformers fail*. Euro TechCon. 2009.
- [3] S. C. Cigré, "An international survey on failures in large power transformers in service". *Electra*. No. 88. 1983. Pp. 21-47.
- [4] X. Wang, "Reliability assessment of the fault diagnosis methodologies for transformers and a new diagnostic scheme based on fault info



- integration". *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on. Vol. 20. No. 6. 2013. Pp. 2292-2298.
- [5] E. Gockenbach, H. Borsi, "Condition monitoring and diagnosis of power transformers". En *Condition Monitoring and Diagnosis. CMD 2008 International Conference on*. IEEE. 2008. Pp. 894-897.
- [6] M. P. Moreira, S. L. T B, M. Vellasco, Power transformers diagnosis using neural networks. En *Neural Networks. IJCNN 2007. International Joint Conference on*. IEEE. 2007. Pp. 1929-1934.
- [7] J. L. Guardado, "A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis". *Power Delivery*, IEEE Transactions on. vol. 16. No 4. 2001 Pp. 643-647.
- [8] R. Liñán, *Experiencias en el desarrollo de sistemas de monitoreo y diagnóstico para transformadores de potencia*. 2001. Cigré. México.
- [9] S. H. Mohamadi, A. Akbari, "A new method for monitoring of distribution transformers". En *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*. IEEE. 2012. Pp. 632-636.
- [10] T, Nagpal, Y. Singh, "Condition Monitoring and Diagnostics of Power Transformers Using WSNs". In *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2011 International Conference on*. IEEE. 2011. Pp. 274-278.
- [11] Q. Wei. W. Wang, "Design of temperature acquisition system for three-phase transformer". In *Computer Science and Information Technology (ICCSIT), 2010 3rd IEEE International Conference on*. IEEE. 2010. Pp. 647-650.
- [12] Z. Hesheng, W. Lide, W. Liwen, "Study on high precision data acquisition system for transformer test". In *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*. IEEE. 2005. Pp. 1731-1735.
- [13] M. Simon, *30 Arduino projects for the evil genius*. 2013. McGraw-Hill Professional.
- [14] M. MARGOLIS, *Arduino cookbook*. 2011. O'Reilly Media, Inc.

- [15] T. Nattachart, T. Thitinan, I. Puwadech, "AC power meter design for home electrical appliances". In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2015 12th International Conference on. IEEE. 2015. Pp. 1-6.
- [16] K. Muhammad Bilal, O. Muhammad, "Automatic power factor correction unit". In *International Conference on Computing, Electronic and Electrical Engineering (ICE Cube)*. IEEE. 2016. Pp. 283-288.
- [17] Arduino Playground The Arduino Playground. <http://playground.arduino.cc/Projects/Ideas>. Agosto 2016
- [18] C. G. H. "Metodología Experimental Para el Diagnóstico de Fallas de Fallas de Cortocircuito entre Vueltas en Devanados de Transformadores". en *Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico*. 1er. 2015.

## **7. Autores**

Hiram Alberto Canseco García (Ixtepec, Oaxaca). Ingeniero Electricista por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como auxiliar académico en el departamento de Energía. Está interesado en las máquinas eléctricas, las energías alternativas, los mercados eléctricos y en el uso de software computacional para optimizar procesos.

I. López García (Ixtepec, Oaxaca). Doctor en Ingeniería, con especialidad en control por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) e Ingeniero Electricista con especialidad en Máquinas Eléctricas por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana en 2006, donde ha impartido diversas asignaturas a nivel licenciatura y asesorado distintos Proyectos de Integración.

Juan C. Olivares Galván (Zamora, Michoacán). En 2003 obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV unidad Guadalajara. Es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el

Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A).

José Jiménez González (México, D.F.). Ingeniero Electricista por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como auxiliar de investigación. Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

Felipe de Jesús González Montañez (México, D.F.). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Mecatrónica en el CINVESTAV unidad Zacatenco. Actualmente es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

Rafael Escarela Pérez (México, D.F.). Obtuvo su licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México en 1992 y su Ph.D. en el Imperial College, Londres en 1996. Se interesa en el modelado de las máquinas eléctricas.

# **CONTROLADOR DIGITAL DE UN RECTIFICADOR PWM MONOFÁSICO, IMPLEMENTADO EN UN DISPOSITIVO PROGRAMABLE DE BAJO COSTO**

***Julio Ortega Alejos***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*j.ortega@itsur.edu.mx*

***Leonel Estrada Rojo***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*l.estrada@itsur.edu.mx*

***Carlos A. Fuentes Hernández***

Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato  
*ca.fuentes@itsur.edu.mx*

***Elías J. J. Rodríguez Segura***

Instituto Tecnológico de Celaya, Departamento de Ingeniería Electrónica  
*j.ortega@itsur.edu.mx*

## **Resumen**

En este documento se presenta un controlador digital implementado en un dispositivo programable de bajo costo para un rectificador PWM monofásico. Se muestra el funcionamiento del convertidor y el esquema de control clásico que se desea implementar, así como las características de los módulos ADC, PWM y la capacidad de procesamiento del dispositivo programable que se utilizó. En los resultados experimentales se comprueba que se obtiene un alto factor de potencia, la corriente ajusta su amplitud y se mantiene senoidal ante perturbaciones en la carga. El controlador se implementó en un microcontrolador de la familia dsPIC de Microchip y el rectificador se trabajó a una potencia de 1 kW.

**Palabra(s) Clave(s):** Dispositivo programable, factor de potencia, lazo de control, rectificador PWM, sintonización.

## 1. Introducción

El rectificador PWM es un convertidor electrónico con altas prestaciones, tales como: factor de potencia alto, bi-direccionalidad, elevación y control del voltaje en modo rectificador y alta eficiencia [1], [2] y [3]; los rectificadores PWM se utilizan en sistemas de recuperación de energía, en variadores de velocidad con frenado regenerativo [3] y actualmente en las microredes.

Se han propuesto diferentes técnicas de control para los rectificadores PWM trifásicos y monofásicos, entre las que se encuentran: Control orientado a voltaje (VOC), control de potencia directa basada en voltaje (V-DPC), control orientado a flujo virtual (VFOC), control de potencia directa basada en flujo virtual (VF-DPC), controlador proporcional resonante, entre otros. La complejidad de las técnicas de control mencionadas está en función de las operaciones matemáticas involucradas y determinan la capacidad de procesamiento del dispositivo programable a utilizar [2].

En el mercado se encuentran plataformas con tecnología de entradas y salidas reconfigurables, RIO (siglas del inglés Reconfigurable Input Output) estándar en la industria de National Instruments conocidas como CompactRIO y myRIO en las cuales se pueden implementar los controladores.

CompactRIO de National Instruments utiliza un software altamente integrado (LABView) y ofrecen ejecutar algoritmos de control avanzado con tiempos de respuesta determinísticos y baja latencia.

NI myRIO utiliza el procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core. Con esta herramienta se pueden crear aplicaciones en el procesador en tiempo real de NI myRIO, aprovechando la configuración de FPGA (siglas del inglés Field Programmable Gate Array).

También se puede disponer de la plataforma de la marca dSPACE. Real-Time Interface (RTI) es el software que integra completamente el hardware dSPACE con Simulink y Real-Time Workshop.

Las técnicas de control propuestas en [1], [2] y [3] se implementaron utilizando las tarjetas dSpace DS1103, dSpace DS1103 y dSPACE DS 1006,

respectivamente; en [4] utilizan la tarjeta compactRIO, mientras que en [5] la técnica de control solo llega hasta la simulación en MATLAB.

De las plataformas mencionadas la más económica es la myRIO de National Instruments, su costo en el mercado es de \$500 dólares, mientras que las otras plataformas pueden tener un precio mínimo de \$1500 dólares. Para propósitos académicos y de investigación, son plataformas de gran ayuda que permiten la validación del modelo de un controlador de forma rápida, justificando de esta manera la inversión; sin embargo, cuando en una aplicación que va a salir al mercado se quiere utilizar un convertidor tal como el rectificador PWM, porque se desea contar con sus características de alto factor de potencia, bidireccionalidad y elevación de voltaje; la implementación del controlador en las plataformas mencionadas resulta en una propuesta inviable económicamente.

En el mercado se dispone también de microcontroladores de propósito específico para el control de convertidores de potencia. Estos dispositivos programables pueden tener un costo de hasta \$10 dólares. Para optimizar al máximo el uso de memoria utilizada por el código del controlador, se recomienda programar en ensamblador para la implementación de las operaciones matemáticas, o bien, se puede hacer una combinación de programación en C y programación en ensamblador. El software que se utiliza para desarrollar el código es gratuito y soporta todas las familias de microcontroladores del fabricante.

Una desventaja de implementar los controladores en esta plataforma es que no se puede monitorear en tiempo real las señales digitales dentro del microcontrolador, lo que provoca que la sintonización del controlador tenga que ser de forma empírica, utilizando como referencia la respuesta de las variables del convertidor electrónico.

## **2. Desarrollo**

### **Principio de funcionamiento del rectificador PWM**

La figura 1 muestra el circuito del rectificador PWM monofásico totalmente controlado conectado en puente, el cual utiliza cuatro interruptores de potencia con diodos conectados en anti-paralelo para obtener un voltaje de cd controlado,

$V_o$ . Para la operación apropiada de este rectificador, la magnitud del voltaje de salida debe ser mayor que la del voltaje de entrada en cualquier momento posterior al transitorio de arranque [6,7,8].

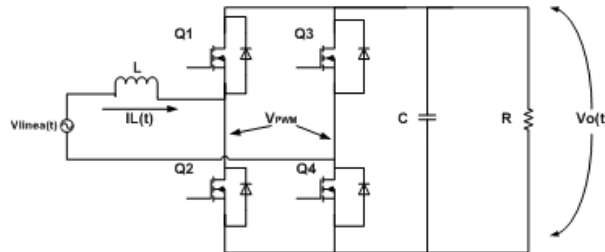


Figura 1 Rectificador PWM monofásico en conexión puente.

El principio de funcionamiento del rectificador PWM se basa en la operación de un convertidor BOOST, el cual pertenece a la familia de convertidores de transferencia de energía indirecta.

El procesamiento de la potencia involucra una fase de almacenamiento y una de liberación de energía. Durante el tiempo de encendido de un par de transistores (Q1 y Q3 ó Q2 y Q4) el inductor almacena energía y el capacitor por si solo suministra energía a la carga. Cuando conducen los transistores Q1 y Q4 ó Q3 y Q2, la energía almacenada en el inductor aparece en serie con la fuente de alimentación y contribuye a suministrar energía al capacitor y a la carga, figura 2.

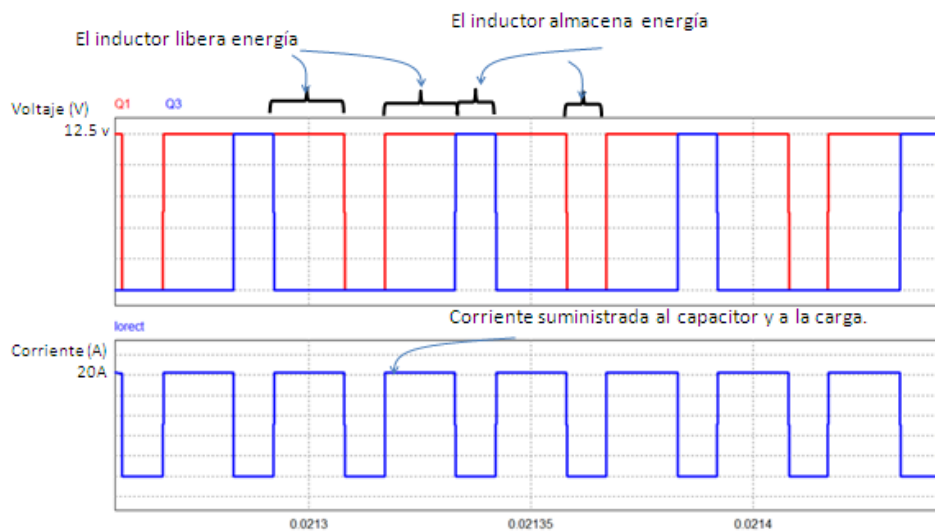


Figura 2 Semi-ciclo positivo del voltaje de red.

La configuración del rectificador PWM proporciona una corriente de entrada no pulsante en el modo de operación de conducción continua y hace de ésta una topología de bajo rizo en la corriente de entrada gracias a que un inductor se opone a variaciones rápidas de la corriente.

Los posibles estados de conmutación de los interruptores con los que puede operar el rectificador PWM se identifican de acuerdo al nivel de voltaje establecido entre los puntos a' y b', conocido como  $V_{PWM}$  y son los siguientes:

- Q1 y Q4 están encendidos, Q2 y Q3 están apagados; por lo que  $V_{PWM} = V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
- Q1 y Q4 están apagados, Q2 y Q3 están encendidos; por lo que  $V_{PWM} = -V_o$  y se proporciona energía al capacitor y a la carga.
- Q1 y Q3 están encendidos, Q2 y Q4 están apagados; por lo que  $V_{PWM} = 0$ . O bien, Q1 y Q3 están apagados, Q2 y Q4 están encendidos; por lo que  $V_{PWM} = 0$  y se almacena energía en el inductor.

Para obtener dichos estados de conmutación se utiliza una modulación senoidal, en donde se hace variar el ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de control se generan comparando una señal senoidal de referencia de frecuencia  $f_r$  con una onda portadora triangular de frecuencia  $f_c$ , figura 3.

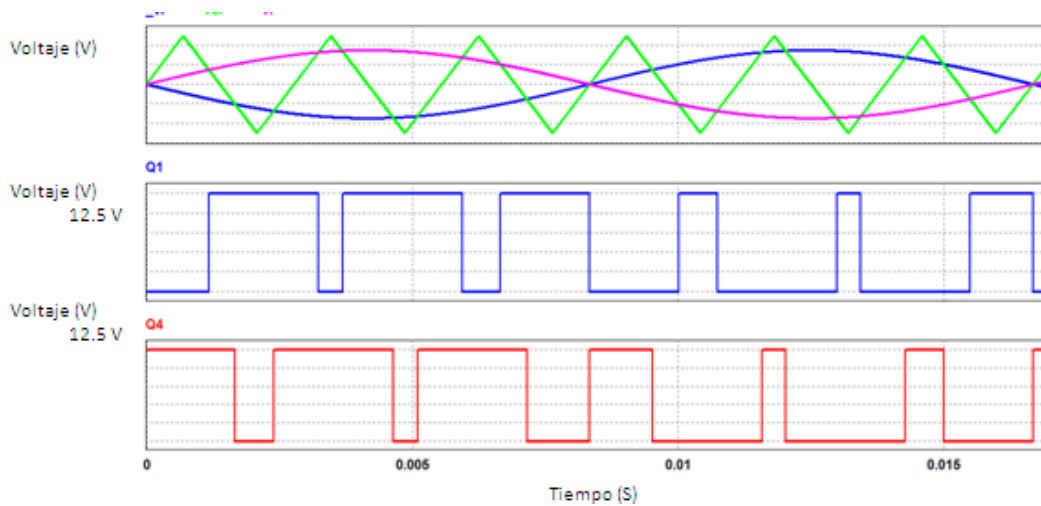


Figura 3 Señales de control de los interruptores a partir de una modulación senoidal.



La amplitud pico de la señal de referencia controla el índice de modulación de amplitud  $m_a$  y en consecuencia el voltaje de salida del convertidor. Al comparar la señal portadora bidireccional  $v_c$ , con dos señales de referencia,  $v_r$  y  $-v_r$ , se producen las señales de disparo de los transistores Q1 y Q4 respectivamente. La señal de disparo del transistor Q2 es el complemento de Q1 y la de Q3 el complemento de Q4. La cantidad de pulsos por ciclo la establece el índice de modulación de frecuencia ( $M_f$ ) que se encuentra en función de las frecuencias de la señal portadora de las señales de referencia, ecuación 1.

$$M_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (1)$$

Cuando es  $M_f$  es mayor a 21 se dice que se tiene un rectificador muy modulado y cuando es menor se dice que está poco modulado. Se justifica este valor con base en el contenido armónico de la señal resultante [9].

## 2.2. Control del rectificador PWM

El esquema de control clásico se muestra en la figura 4. El control incluye un controlador de voltaje, [10]. Típicamente es un controlador proporcional- integral (PI), el cual controla la cantidad de potencia requerida para mantener el voltaje de salida de CD ( $V_o$ ) constante. El controlador de voltaje proporciona el punto de ajuste de la amplitud de la corriente de entrada. Por esta razón, la salida del controlador de voltaje se multiplica por una señal senoidal con la misma fase y frecuencia del voltaje de la red,  $v_s(t)$ , a fin de obtener la referencia de la corriente de entrada,  $i_{sref}$ .

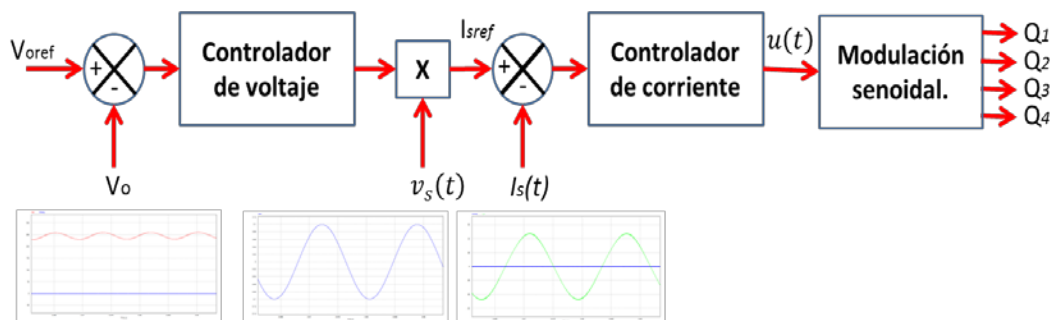


Figura 4 Esquema de control clásico para el rectificador PWM.

El controlador de corriente proporciona la señal de control que determinará el índice de modulación de amplitud. La rápida respuesta del controlador de corriente, provoca que se obtenga un alto factor de potencia en la entrada del convertidor.

El voltaje de salida del rectificador,  $V_o$ , presentará un rizo con una frecuencia igual al doble de la frecuencia de línea. Si este rizo pasa a través del controlador de voltaje, producirá una componente del tercer armónico en la corriente de entrada. La amplitud de este armónico se puede atenuar con un filtro pasa bajas en la retroalimentación del voltaje de salida,  $V_o$ .

### Diseño del sistema

El sistema está conformado principalmente por la etapa de potencia que se encargará de realizar la conversión de energía alterna a continua a través del rectificador PWM, el cual es comandado por las señales provenientes de la etapa de control en donde se implementan en un micro-controlador los algoritmos para la regulación de voltaje y corriente, tal como se muestra en la figura 5. El rectificador PWM se dimensionó a una potencia de 1 kW, voltaje de entrada de 100 V y voltaje de salida de 120 V.

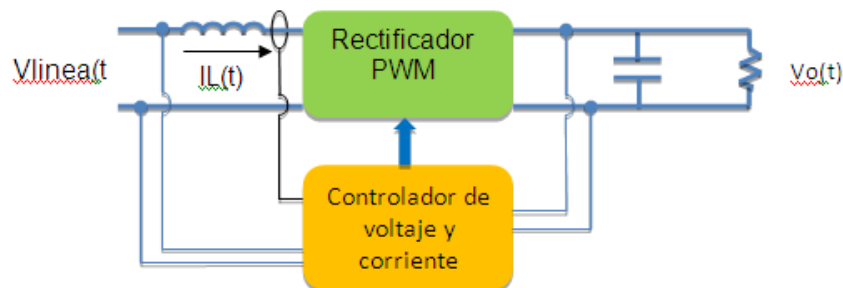


Figura 5 Diagrama a bloques del Rectificador PWM en lazo cerrado.

Los niveles de voltaje de la red y de salida del rectificador se obtienen por medio de sensores ISO124 con aislamiento capacitivo. El sensor correspondiente al voltaje de salida del rectificador proporciona un voltaje directo de 2.5 volts cuando en el bus de salida se tienen 125 volts. Ésta señal se transmite directamente a un canal de conversión del CAD (Siglas de Convertidor Analógico a Digital).

El sensor del voltaje de red, entrega una señal de  $\pm 2.5$  volts pico cuando el voltaje pico de la red es de  $\pm 105$  volts. Dado que la polaridad del voltaje de la red cambia por su forma de onda senoidal, es necesario efectuar un acondicionamiento de la señal a fin de que al microcontrolador solamente le lleguen valores positivos de la señal; por tal motivo fue necesario rectificar la señal senoidal con un rectificador de precisión implementado con amplificadores operacionales para que no se tuvieran recortes en la señal de voltaje debido a la pérdida de 0.7 volts que presentan los diodos en los rectificadores convencionales; Se implementó también un detector de semi-ciclo que envía una señal en alto a una terminal del microcontrolador cuando se presente un semi-ciclo positivo en el voltaje de la red para que se logre sincronizar. El detector de semi-ciclo debe ser implementado con un amplificador operacional con una configuración con retroalimentación positiva para que se pueda agregar una ventana de histéresis de 0.1 volt para evitar falsas transiciones por efectos del ruido.

La corriente del inductor se retroalimenta con un transductor de corriente LEM25 que proporciona  $\pm 0.625$  volt por cada 25 Amperes con un offset de 2.5 volts. El acondicionamiento de la señal es muy parecido al de la señal de voltaje de la red. Con excepción de que se le agrega un restador de 2.5 volts para tener la referencia de 0 amperes en 0 volts y posteriormente pasar al rectificador de precisión y al detector de semiciclo, figura 6.

### **Implementación del control digital**

Para la implementación del controlador se deben de analizar los requerimientos computacionales para la manipulación de las señales involucradas en el mismo. Como se puede observar en la figura 4, es necesario efectuar comparaciones, multiplicaciones, la implementación de dos controladores PI y generar una señal triangular para la modulación PWM. Si la implementación del controlador fuera de manera completamente analógica, involucraría una gran cantidad de componentes que implicaría una mayor susceptibilidad de las señales a ser contaminadas por el ruido generado por las conmutaciones del convertidor de potencia, requeriría mayor espacio e

involucraría un cambio continuo de los componentes durante las pruebas experimentales a fin de modificar ganancias, acondicionamientos de señal y sintonización de controladores PI.

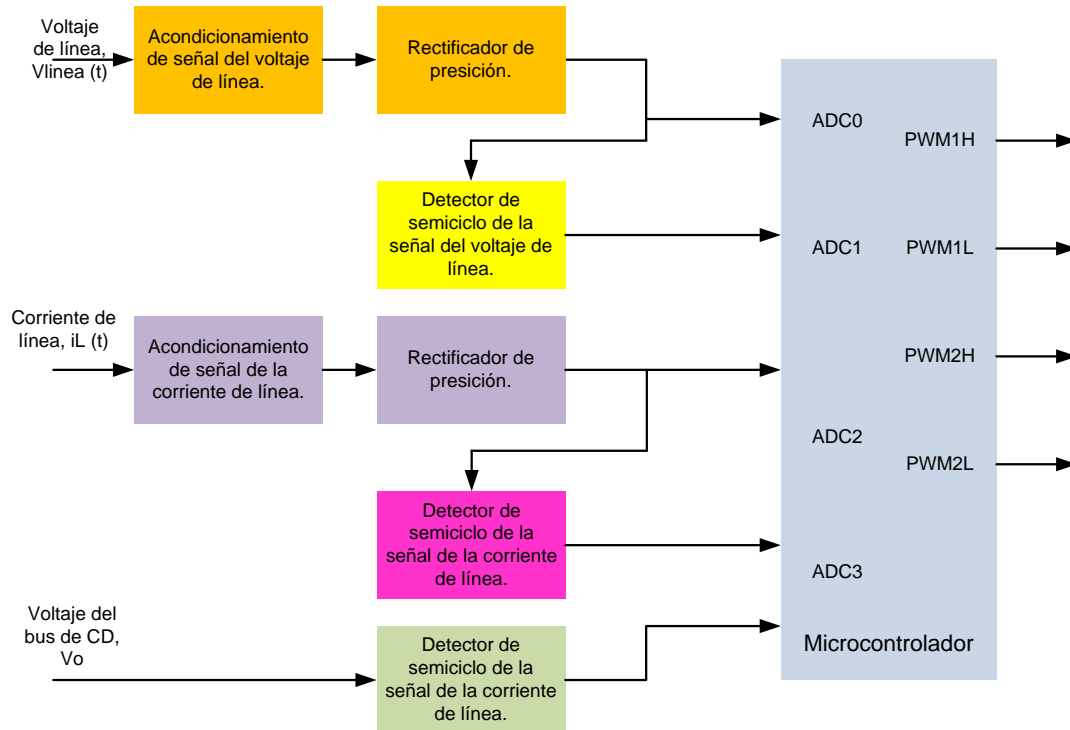


Figura 6 Diagrama a bloques del acondicionamiento de señales.

Por tal motivo se optó por la implementación del controlador de manera digital, se seleccionó un microcontrolador de la familia dsPIC de Microchip de propósito específico para el control de convertidores de potencia, el dsPIC30F4011. Éste microcontrolador se caracteriza fundamentalmente por tener módulos para la generación de señales PWM, múltiples canales de conversión analógico a digital (CAD) de 10 bits y capacidad de efectuar multiplicaciones en un ciclo de reloj a una velocidad de ejecución de las instrucciones de 30 mega instrucciones por segundo (MIPS). Ésta capacidad de procesamiento permite manipular las señales en un tiempo muy corto durante cada ciclo de conmutación del convertidor.

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo para la inicialización de los módulos ADC, PWM y puertos de propósito general, mientras en la figura 8 se

presenta el diagrama de flujo de la rutina de interrupción del ADC, la cual debe de ejecutarse en un tiempo no mayor a un ciclo de conmutación.

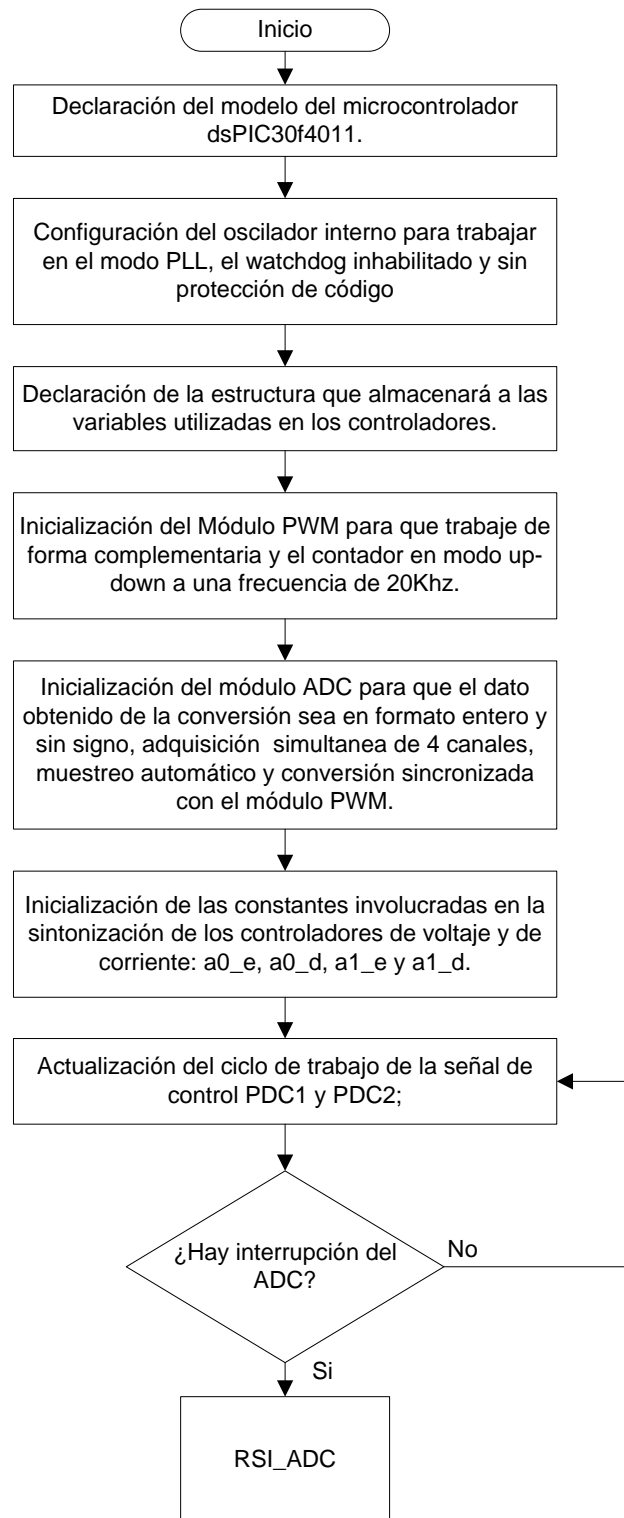


Figura 7 Diagrama de flujo del programa principal utilizando el lenguaje C.

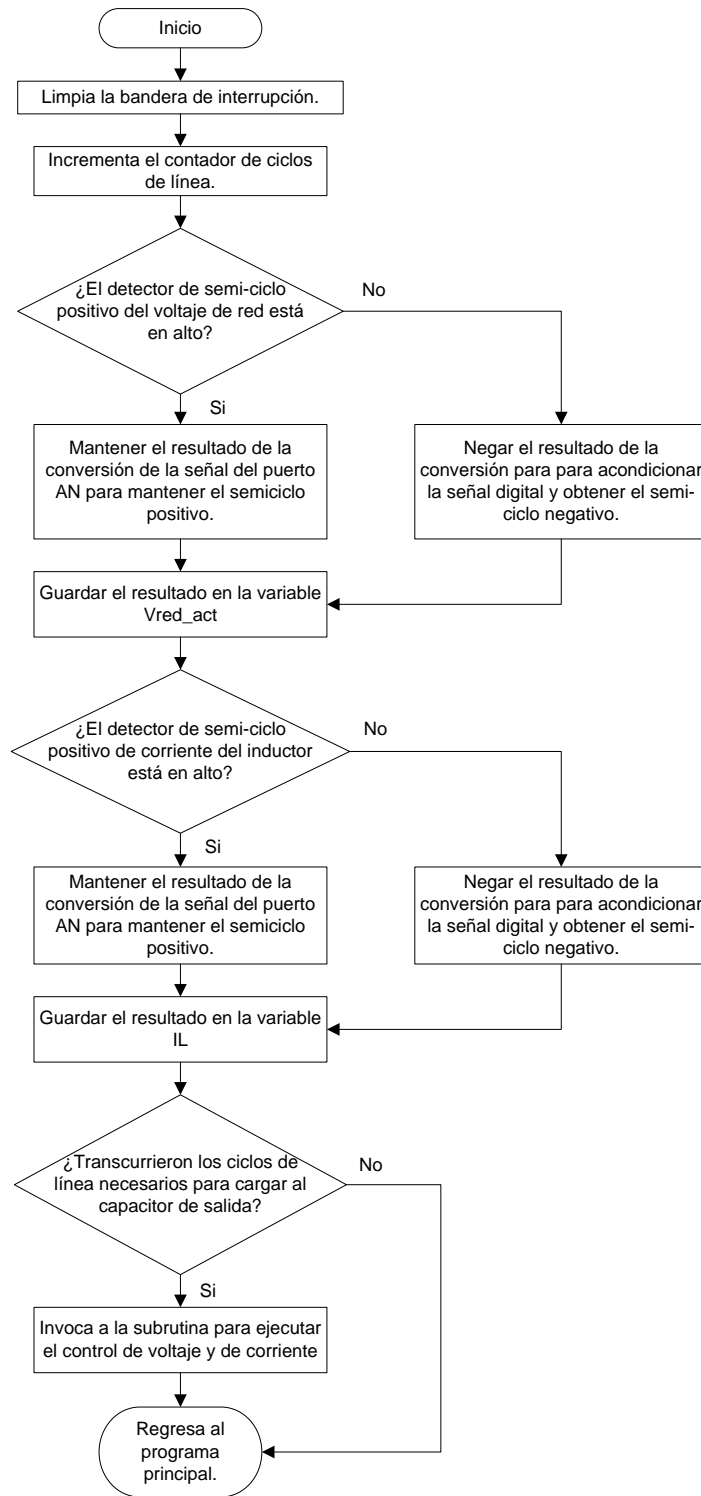


Figura 8 Diagrama de flujo de la subrutina de control de la interrupción del ADC.

Como se mencionó anteriormente, las señales de control del rectificador se obtendrán a partir de una modulación senoidal, en donde son necesarias dos

señales senoidales de referencia, una de dichas señales es la que se obtiene directamente del controlador de corriente ( $v_r$ ) y se obtiene su inversa para generar la otra señal de referencia ( $-v_r$ ). La señal portadora bidireccional  $V_c$ , se obtiene del módulo PWM del dsPIC y consiste en un contador ascendente – descendente llamado PTMR en donde el valor máximo de conteo asignado determina la frecuencia de conmutación de la señal PWM, figura 9. El valor de PTMR está en función de la velocidad de ejecución de las instrucciones y la frecuencia deseada del PWM como se expresa en la ecuación 2 [11].

$$PTPER = \frac{F_{cy}}{F_{PWM} * (PTMR \text{ Prescaler}) * 2} - 1 \quad (2)$$

En donde:

PTPER Valor máximo asignado al contador para establecer la frecuencia de conmutación deseada del PWM.

$F_{cy}$  Frecuencia de ejecución de las instrucciones;

$F_{PWM}$  : Frecuencia deseada de la señal PWM;

El valor de las señales de referencia  $v_r$  y  $-v_r$  se cargan a los registros PDC1 y PDC2, respectivamente. Con el resultado de la comparación de estas señales se obtienen los pulsos de control de los cuatro transistores.

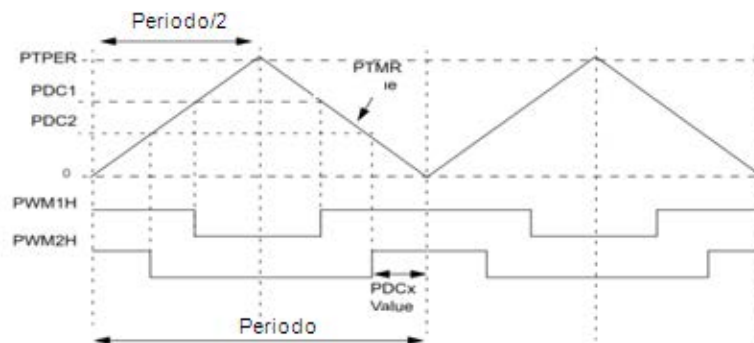


Figura 9 Pulsos de control de los transistores mediante la modulación senoidal.

Para la implementación de los controladores PI se utilizó una estructura canónica directa, figura 10, en donde se aprovechó la capacidad del microcontrolador para efectuar multiplicaciones en un ciclo de reloj utilizando las instrucciones MCU.

Con las instrucciones MCU, el microcontrolador solamente trabaja con números enteros, por lo que se aplicaron algunos artificios computacionales para la multiplicación con números fraccionarios, los cuales son empleados en las ganancias para la sintonización de los controladores  $a_0$  y  $a_1$  [12].

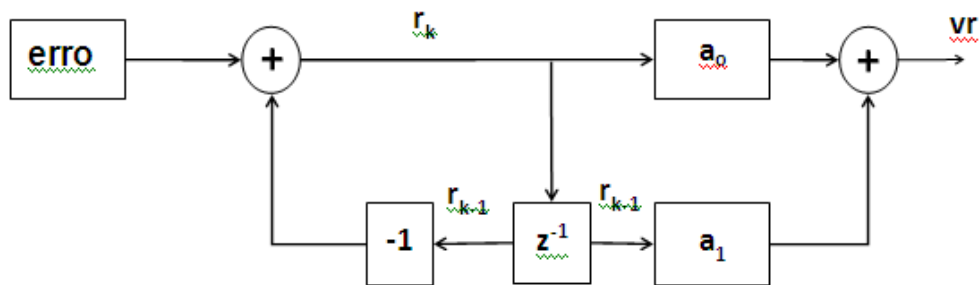


Figura 10 Estructura canónica directa para la implementación del controlador PI.

### 3. Resultados

En la figura 11 se presenta el prototipo del rectificador PWM el cual está conformado principalmente por la etapa de potencia y de control. La etapa de potencia está compuesta por un módulo de transistores con capacidad de conducción de corriente de 30 Amperes y capacidad de bloqueo de voltaje de 600 volts, un inductor de entrada de baja frecuencia, capacitor de filtrado en el bus de CD, circuito de arranque, impulsores para los transistores y fuentes de alimentación aisladas de +15 volts. En la etapa de control se encuentran los sensores de corriente y de voltaje, los acondicionadores de señal, el dispositivo programable de bajo costo y las fuentes de alimentación de +15 volts y -15 volts.

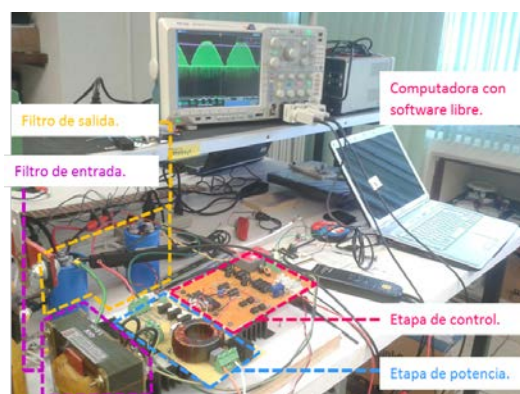


Figura 11 Prototipo del rectificador PWM.



Se demandó una potencia de 1 kW al rectificador, en la figura 12 la corriente corresponde al canal 4 (color verde) y el voltaje al canal 3 (color rosa). Se puede apreciar que la corriente tiene una forma de onda senoidal y se encuentra en fase con el voltaje, por lo que el factor de potencia es unitario. El canal M, corresponde a la forma de onda de la potencia de entrada, los valores que presenta son solamente positivos, por lo que el convertidor está demandando solamente potencia activa.

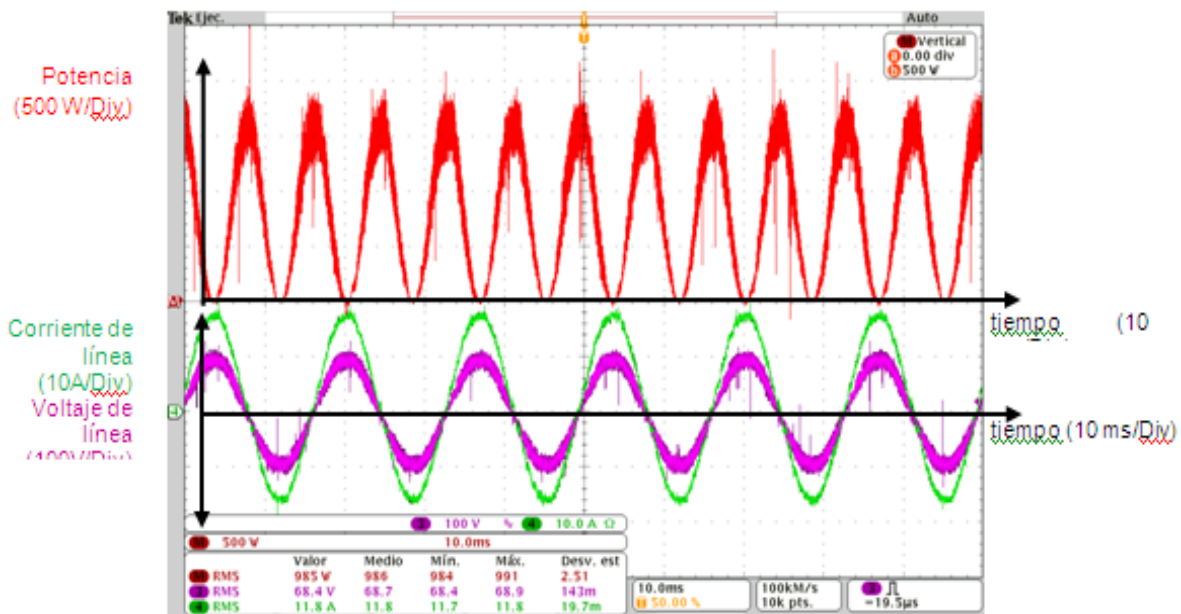


Figura 12 Rectificador operando en lazo cerrado.

En la figura 13 se muestra las respuestas de la potencia, corriente y voltaje de entrada del rectificador PWM ante una perturbación en la carga, se puede apreciar que la corriente y el voltaje se mantienen en fase provocando que la potencia siga manteniendo solamente valores positivos.

En la figura 14 se muestra la forma de onda de la corriente y su espectro en frecuencia. La componente fundamental es la de mayor magnitud comparada con los armónicos, por lo que se comprueba que se tiene un bajo contenido armónico.

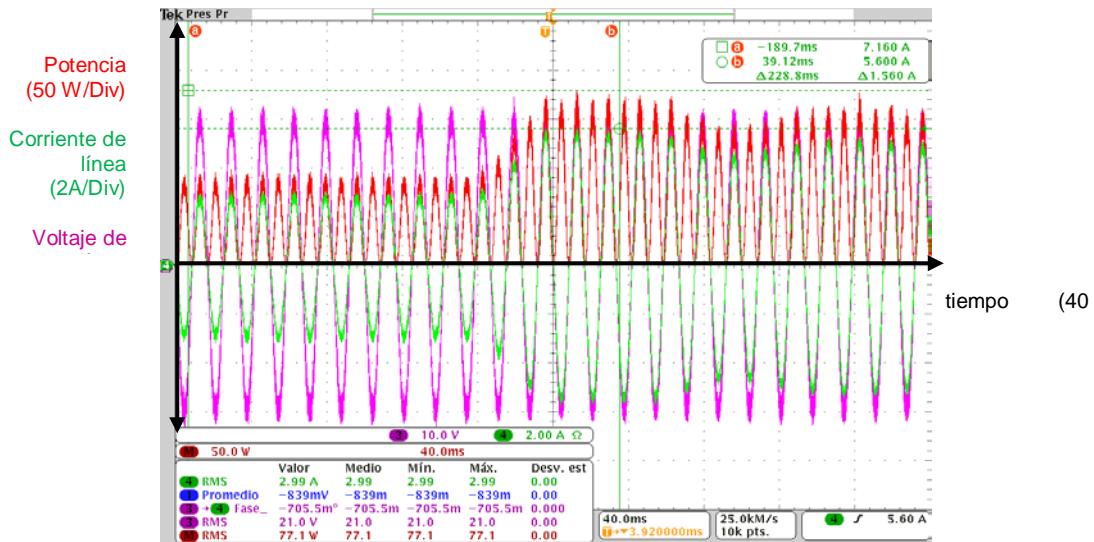


Figura 13 Rectificador operando en lazo cerrado ante una perturbación en la carga.



Figura 14 Forma de onda de la corriente de línea y su espectro en frecuencia.

#### 4. Discusión

A pesar de que el software utilizado para el desarrollo del controlador digital no cuenta con una herramienta para el monitoreo gráfico de las respuestas de las señales involucradas en cada bloque del controlador, se logró sintonizar el lazo de control de corriente y el lazo de control de voltaje con ayuda de la respuesta de las señales de potencia en el rectificador PWM; particularmente la señal de corriente fue la que se comportaba más inestable ante las variaciones en las ganancias de los controladores. Una vez encontradas las ganancias de manera

empírica se caracterizó el rectificador PWM a potencias cada vez mayores hasta llegar a 1 kW. Una vez alcanzada la potencia máxima se sometió a perturbaciones en el voltaje de entrada y en la carga, comportándose de manera satisfactoria el sistema.

## **5. Conclusiones**

Con un dispositivo programable de bajo costo fue posible implementar un controlador de voltaje y uno de corriente para un rectificador PWM, se obtuvo un factor de potencia alto gracias a que se forzó a la forma de onda de corriente a ser senoidal y además que estuviera en fase con el voltaje de línea. El voltaje de salida del convertidor trata de mantenerse ante perturbaciones en la carga y variaciones del voltaje de entrada. Con el uso de microcontroladores de propósito específico se pueden implementar técnicas de control para convertidores de potencia, logrando de esta manera disminuir el costo de un producto que se pretende sacar al mercado.

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el Instituto Tecnológico de Celaya para realizar las pruebas del convertidor en el laboratorio de investigación en energías renovables del departamento de ingeniería eléctrica y electrónica.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, S. Hansen “Virtual-Flux-Based Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifiers”. IEEE transactions on industry applications. Vol. 37. No. 4. July/august 2001.
- [2] M. Malinowski, M. P. Kazmierkowski, “Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers in AC Adjustable Speed Drives”. IEEE transactions on power electronics. Vol. 18. No. 6. November 2003.
- [3] J. Dannehl, C. Wessels, “Limitations of Voltage-Oriented PI Current Control of Grid-Connected PWM Rectifiers With LCL Filters”. IEEE transactions on industrial electronics. Vol. 56. No. 2. February 2009.
- [4] D. Castro, J. Fernández, Design and implementation of a Three-Phase Boost Battery Charger with PFC using CompactRIO control system. 2012.

- Department of energy and environment division of electric power engineering, Chalmers university of technology. Göteborg, Sweden.
- [5] J. Pérez, G. Núñez, A. Ciro, G. Cárdenas, "Control lineal para un rectificador monofásico PWM puente completo". RIEE&C, revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación. Vol. 7. No. 2. Diciembre 2009.
- [6] L. Grman, M. Hraňsko, J. Kuchta, J. Buday, "Single phase pwm rectifier in traction application". Journal of electrical engineering. Vol. 62. No. 4. 2011. Pp. 206–212.
- [7] R. Balamurugan, G. Gurusamy, "Harmonic Optimization by Single Phase Improved Power Quality AC-DC Power Factor Corrected Converters". International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Volume 1. No. 5.
- [8] J. R. Rodriguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, P. Lezana, "PWM regenerative rectifiers: state of the art". Industrial Electronics, IEEE Transactions on. Volume 52. Issue 1. Feb. 2005. Pp. 5 – 22.
- [9] R. Muhammad H. *Electrónica de Potencia Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. Tercera Ed. 2004. Pearson, Prentice Hall.
- [10] O. Stihl, "A single-phase controlled current PWM rectifier". IEEE transaction on power electronics. Vol3. No. 4. 1988.
- [11] Hoja de datos del microcontrolador dsPIC30F4011, Microchip Technology Inc. 2005.
- [12] D. Ibrahim, *Microcontroller Based Applied Digital Control*, 2006, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-86335-8.

## 7. Autores

M.C. Julio Ortega Alejos. Obtuvo su título como Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente se desempeña como profesor investigador en la coordinación de ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

M.C. Leonel Estrada Rojo. Obtuvo su título como Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, actualmente se

desempeña como profesor investigador en la coordinación de ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

Dr. Elías J. J. Rodríguez Segura. Obtuvo el grado de Doctor en ciencias en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en Cuernavaca Morelos, Actualmente se desempeña como profesor investigador de tiempo completo en el departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Carlos A. Fuentes Hernández. Obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de Óptica Física en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada B.C. Actualmente se desempeña como profesor investigador en el Instituto Tecnológico Superior del Sur de Guanajuato.

# ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONVERTIDOR $\dot{C}$ UK PARA ILUMINACIÓN LED

**Francisco Juárez León**

Instituto Tecnológico de Celaya

*f.ale\_juarez@hotmail.com*

**Elías Rodríguez Segura**

Instituto Tecnológico de Celaya

*elias.rodriguez@itcelaya.edu.mx*

## Resumen

El presente artículo describe el análisis, diseño, implementación y resultados experimentales de un convertidor  $\dot{C}$ uk como fuente de alimentación para un luminario LED. Para el análisis del convertidor se utilizó el modelado mediante espacio de estados, a través del cual se determinó la solución en estado estable y las funciones de transferencia necesarias para cerrar el lazo de control. El convertidor implementado opera en modo de conducción continua (MCC) cuyo voltaje de salida son 68 V y una corriente de 0.88 A para manejar el luminario comercial de 60 W.

**Palabras Claves:** Convertidor  $\dot{C}$ uk, espacio de estados, iluminación LED.

## 1. Introducción

El convertidor  $\dot{C}$ uk es un tipo de convertidor CD - CD, no aislado desarrollado por el profesor Slobodan  $\dot{C}$ uk del Instituto de Tecnología de California. Este convertidor a diferencia de las topologías básicas (Buck, Boost y Buck-Boost), utiliza un capacitor para la transferencia de energía entrada-salida a lo largo del ciclo de conmutación, de tal forma el uso de este capacitor permite obtener una mejor relación entre la energía almacenada y el tamaño del convertidor [1]. Una de las ventajas de esta topología es que cuenta con inductancia a su entrada y a su salida, lo cual reduce significativamente el EMI conducido y los requerimientos

de una etapa de filtrado se hacen mínimos [2]. De tal modo, resulta ser un convertidor adecuado para iluminación LED debido a que, tanto la corriente de entrada como la de salida del convertidor son continuas y no pulsantes como en otros convertidores. Esta característica le viene bien tanto al LED como a la fuente de alimentación del convertidor dado que se reduce el estrés en los dispositivos electrónicos.

En la sección 2 de este artículo se detalla el análisis matemático del convertidor  $\dot{C}uk$  utilizando el modelado mediante espacio de estados, incluyendo todos los parámetros no ideales del sistema tales como, los inductores con su resistencia serie asociada (pérdidas en el cobre), capacitor de transferencia con su resistencia serie asociada (ESR), capacitor de salida sin ESR, un diodo visto como un interruptor en serie con una fuente de voltaje y un transistor MOSFET como un interruptor en serie con una resistencia de encendido. Una vez obtenida la base matemática del convertidor se procedió con la etapa de diseño e implementación física. En la sección 3 se muestran los resultados de simulación y los resultados experimentales. Por último, en la sección 4 se exponen las conclusiones obtenidas al término de este trabajo.

## **2. Desarrollo**

### **Ecuaciones de estado del convertidor $\dot{C}uk$**

Para el estudio del convertidor  $\dot{C}uk$  se utilizó el modelado mediante espacio de estados. Este tipo de modelado representa una técnica matemática que aproxima cualquier convertidor CD - CD a un sistema lineal continuo en tiempo y que además, permite al diseñador determinar voltajes y corrientes en estado estable y las funciones de transferencia que rigen el funcionamiento del convertidor [3]. Utilizar esta herramienta de análisis implica definir un vector de estado  $x(t)$  donde aparecen las corrientes en los inductores y voltajes en los capacitores del circuito, un vector de entradas  $u(t)$  y un vector de salida  $y(t)$ . Para fines del análisis no se definió un vector de salida  $y(t)$  debido a que las variables de interés aparecen dentro del vector de estado  $x(t)$ .

En un convertidor CD – CD que opera en MCC existen dos intervalos de trabajo:  $t_{on}$  (intervalo de encendido) y  $t_{off}$  (intervalo de apagado). El intervalo de encendido se denota como  $DT$  y el intervalo de apagado como  $D'T = (1-D)T$ , donde  $T$  es el periodo de la señal de activación para el interruptor principal y  $D$  el ciclo de trabajo. En la figura 1 se muestra el convertidor Ćuk con todos los elementos parásitos considerados para su análisis y en la figura 2 y 3 se muestran los circuitos equivalentes del convertidor en  $t_{on}$  y  $t_{off}$  respectivamente.

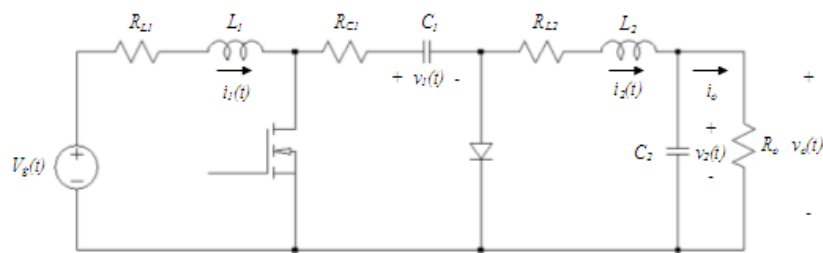


Figura 1 Convertidor Ćuk.

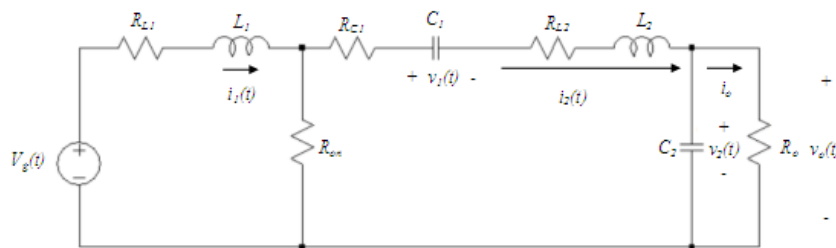


Figura 2 Circuito equivalente del convertidor Ćuk en  $t_{on}$ .

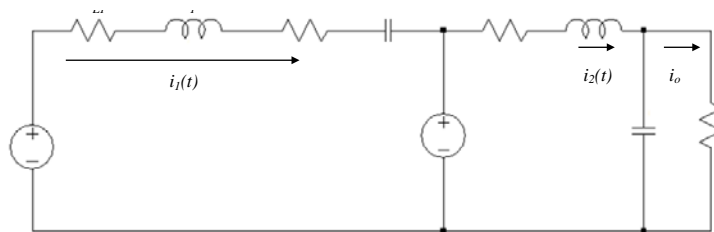


Figura 3 Circuito equivalente del convertidor Ćuk en  $t_{off}$ .

Considerando  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $v_1(t)$  y  $v_2(t)$  como variables de vector de estado  $x(t)$  y analizando el convertidor en  $t_{on}$  (figura 2) se obtiene ecuación 1, ecuación de estado.



$$K \frac{d}{dx} x(t) = A_1 x(t) + B_1 u(t) \quad , \quad x(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} \quad , \quad u(t) = \begin{bmatrix} V_g(t) \\ V_D \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $K$  es la matriz de constantes del sistema y su valor viene dado por ecuación 2.

$$K = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Y las matrices  $A_1$  y  $B_1$ , ecuaciones 3.

$$A_1 = \begin{bmatrix} -R_{L1} - R_{on} & R_{on} & 0 & 0 \\ R_{on} & -R_{on} - R_{L2} - R_{C1} & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{R_o} \end{bmatrix} \quad , \quad B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Del mismo modo es posible determinar la ecuación de estado del convertidor en el intervalo  $t_{off}$  (figura 3), ecuación 4.

$$K \frac{d}{dx} x(t) = A_2 x(t) + B_2 u(t) \quad , \quad x(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} \quad , \quad u(t) = \begin{bmatrix} V_g(t) \\ V_D \end{bmatrix} \quad (4)$$

Siendo  $K$  la misma matriz de constantes presente en el estado  $t_{on}$ , cuyos elementos en la diagonal principal son los valores de los componentes inductivos y capacitivos.

Y las matrices  $A_2$  y  $B_2$ , ecuaciones 5.

$$A_2 = \begin{bmatrix} -R_{L1} - R_{C1} & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -R_{L2} & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{R_o} \end{bmatrix} \quad , \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

De tal forma, es posible combinar las ecuaciones 1 y 4 que muestran el estado del convertidor Ćuk en  $t_{on}$  y  $t_{off}$ , ecuación 6.

$$K \frac{d}{dx} x(t) = A_p x(t) + B_p u(t) \quad \text{donde:} \quad \begin{cases} A_p = A_1 D + A_2 (1-D) \\ B_p = B_1 D + B_2 (1-D) \end{cases} \quad (6)$$

Sustituyendo las matrices mostradas en (3) y (5) en la expresión anterior se obtienen los coeficientes  $A_p$  y  $B_p$ , ecuaciones 7.

$$A_p = \begin{bmatrix} DR_{C1} - R_{L1} - DR_{on} - R_{C1} & DR_{on} & D-1 & 0 \\ DR_{on} & -R_{L2} - DR_{on} - DR_{C1} & -D & -1 \\ 1-D & D & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{1}{R_o} \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 1 & D-1 \\ 0 & 1-D \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### Solución en estado estable

Una vez definidas las ecuaciones de estado del convertidor Ćuk y suponiendo que éste se encuentra en equilibrio (estado estable), se puede determinar el valor promedio de las variables de estado con ecuaciones 8 y 9.

$$K \frac{d}{dx} x(t) = A_p x(t) + B_p u(t) = 0 \quad \Rightarrow \quad X = -A_p^{-1} B_p U = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$X = \begin{bmatrix} \frac{(DV_g - V_D + DV_D)D}{\beta} \\ \frac{(DV_g - V_D + DV_D)(D-1)}{\beta} \\ \frac{D^2 [V_D(R_o + R_{L1} + R_{L2}) + V_g R_{C1}] + D [V_g(R_o - R_{on} - R_{C1} + R_{L2}) - V_D(2R_o + R_{L1} + 2R_{L2})] - (V_g - V_D)(R_o + R_{L2})}{\beta} \\ \frac{(DV_g - V_D + DV_D)R_o(D-1)}{\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Dónde  $U$  es el vector de entrada con valores constantes del voltaje de entrada y el voltaje en el diodo y

$$\beta = R_o - 2R_o D + R_{L2} + D^2(R_{L1} + R_{L2} + R_o - R_{C1}) + DR_{on} + DR_{C1} - 2DR_{L2}.$$

### Modelo en pequeña señal

A partir del modelo en espacio de estados es posible obtener un “modelo perturbado” que describa la dinámica del sistema bajo una pequeña perturbación de CA. Dicho modelo se puede representar con ecuación 10.

$$K \frac{d}{dx} \hat{x}(t) = A_p \hat{x}(t) + B_p \hat{u}(t) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U] \hat{d}(t) \quad (10)$$

Aplicando la Transformada de Laplace a la ecuación 10, se obtiene ecuación 11.

$$sK\hat{X}(s) = A_p\hat{X}(s) + B_p\hat{U}(s) + [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U] \hat{d}(s) \quad (11)$$

Donde  $\hat{X}(s)$  es el vector de estado perturbado en el dominio de la variable “s” y  $\hat{U}(s)$  el vector de entrada perturbado. Así mismo, aparece el término  $\hat{d}(s)$  el cual representa la señal de control del convertidor.

### Funciones de transferencia Entrada-Salida

Dada la ecuación (11) y haciendo  $\hat{d}(s) = 0$  se pueden encontrar las funciones de transferencia Entrada-Salida que describen la relación  $\frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)}$ , como se muestra en ecuación 12.

$$\frac{\hat{X}(s)}{\hat{U}(s)} = (sK - A_p)^{-1} B_p \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

### Funciones de transferencia Control-Salida

Del mismo modo, pero haciendo  $\hat{U}(s) = 0$  se pueden encontrar las funciones de transferencia Control-Salida que describen la relación que existe entre las variables de estado y la señal de control  $\frac{\hat{X}(s)}{\hat{d}(s)}$  como muestra ecuación 13.

$$\frac{\hat{X}(s)}{\hat{d}(s)} = (sK - A_p)^{-1} [(A_1 - A_2)X + (B_1 - B_2)U] \quad (13)$$

Estas funciones de transferencia son de suma importancia para operar el convertidor en un lazo cerrado de control y pueda corregir ante alguna

perturbación a su entrada o a su salida. Así mismo, en cuestión de términos matemáticos, estas expresiones resultan ser muy largas, es por ello que se recurre al apoyo de software como MATLAB para su manejo.

### Diseño del convertidor Ćuk

El luminario LED CUBIC SOFT de 60 x 120 cm de acuerdo con su ficha técnica, maneja una potencia de 60 Watts a un voltaje de 68 V y una corriente 0.88 A [4]. El voltaje de alimentación para el convertidor Ćuk parte de un bus de CD de 48 V (bus de alimentación común en una micro-red de CD); así, se tienen los siguientes parámetros de diseño:

- Voltaje de entrada:  $V_g = 48 \text{ V}$
- Voltaje de salida:  $V_o = v_{C2}(t) = -68 \text{ V}$
- Potencia de salida:  $P_o = 60 \text{ W}$
- Corriente de LED:  $I_o = 0.88 \text{ A}$
- Resistencia proporcional a la demanda de potencia:  $R_o = |V_o / I_o| = 77 \Omega$
- Frecuencia de conmutación:  $f_s = 100 \text{ kHz}$

Igualando a cero todos los elementos no ideales del convertidor ( $R_{L1}$ ,  $R_{L2}$ ,  $R_{C1}$ ,  $R_{C2}$ ,  $R_{on}$ ,  $V_D$ ), es posible determinar el valor del ciclo de trabajo, ecuación 14.

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_g} = \frac{68}{68 + 48} = 0.586 = 58.6\% \quad (14)$$

Sustituyendo los valores conocidos y el ciclo de trabajo  $D$  en la ecuación 9 se obtienen los siguientes valores en el punto de operación, ecuación 15.

$$X = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.25 \text{ (A)} \\ -0.882 \text{ (A)} \\ 116 \text{ (V)} \\ -68 \text{ (V)} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Como se puede apreciar el inductor de entrada  $L_1$  manejará una corriente promedio de 1.25 A, el inductor de salida  $L_2$  una corriente de -0.882 A, el

capacitor intermedio  $C_1$  tendrá un voltaje promedio de 116 V y finalmente el capacitor de salida un voltaje promedio de -68 V, respetando las polaridades indicadas en la Figura 1. Al determinar estas cantidades es posible dimensionar el valor de los inductores y capacitores de acuerdo con las siguientes especificaciones de diseño:

- Rizo de corriente en el inductor  $L_1$ :  $\Delta_1 = 0.1I_1$
- Rizo de corriente en el inductor  $L_2$ :  $\Delta_2 = 0.15I_2$
- Rizo de voltaje en el capacitor  $C_1$ :  $\delta_1 = 0.1V_1$
- Rizo de voltaje en el capacitor  $C_2$ :  $\delta_2 = 0.002V_2$

El valor del inductor  $L_1$  viene dado por ecuación 106.

$$L_1 = \frac{V_g D}{2\Delta_1 f_s} = \frac{48(0.586)}{2(0.1)(1.25)(100000)} = 1.12 \text{ mH} \quad (16)$$

El valor del inductor  $L_2$ , ecuación 17.

$$L_2 = -\frac{(V_1 + V_o)D}{2\Delta_2 f_s} = -\frac{(116 - 68)(0.586)}{2(0.15)(-0.882)(100000)} = 1.06 \text{ mH} \quad (17)$$

El capacitor  $C_1$ , ecuación 18.

$$C_1 = -\frac{I_2 D}{2\delta_1 f_s} = -\frac{(-0.882)(0.586)}{2(0.1)(116)(100000)} = 222 \text{ nF} \quad (18)$$

Finalmente, el valor del capacitor  $C_2$ , ecuación 19.

$$C_2 = \frac{\Delta_2}{8f_s \delta_2} = \frac{(0.15)(-0.882)}{8(100000)(0.002)(-68)} = 1.21 \mu\text{F} \quad (19)$$

### Componentes del convertidor

Para el inductor  $L_1$  se utilizó un núcleo de ferrita RM-10 con 39 vueltas de cuatro hilos trenzados calibre 29, la inductancia obtenida es de 1.2 mH con una resistencia serie asociada de 2  $\Omega$ . De la misma forma se utilizó un núcleo RM-10 para el inductor  $L_2$  con 36 vueltas del mismo conductor, obteniendo una inductancia de 1.1 mH y una resistencia serie cercana a los 2  $\Omega$ . Ambos

inductores fueron medidos a una frecuencia de 100 kHz con un LCR Meter LCR-916 GW-INSTEK.

Respecto al capacitor  $C_1$ , se eligió un capacitor no polarizado de Polipropileno de 220 nF @ 600 V y una resistencia serie de 10 mΩ. Para el capacitor de salida  $C_2$  se utilizó uno electrolítico de 1 μF a 100 V. El transistor MOSFET elegido para el convertidor es un IRFB17N20D, el cual cuenta con una resistencia de encendido de 0.17 Ω, una capacidad de manejo de corriente de 16 A y soporta un voltaje drenaje-fuente de 200 V [5]. En el caso del diodo se eligió uno de carburo de Silicio Schottky CREE C3D20060D de conmutación extremadamente rápida; la caída de voltaje entre las terminales de este dispositivo típicamente es de 1.8 V [6]. En tabla 1 se muestran los valores de cada uno de los elementos utilizados para el convertidor Ćuk.

Tabla 1 Valores de los elementos del convertidor.

Componente	Valor
Inductor $L_1$	1.2 mH
Inductor $L_2$	1.1 mH
Capacitor $C_1$	220 nF
Capacitor $C_2$	1 μF
Resistencia parásita $R_{L1}$	2 Ω
Resistencia parásita $R_{L2}$	2 Ω
Resistencia parásita $R_{C1}$	10 mΩ
Resistencia del MOSFET $R_{on}$	0.17 Ω
Caída de voltaje en el diodo $V_D$	1.8 V

Al considerar los parásitos reales en el sistema, el valor del ciclo de trabajo en el punto de operación estará dado por la solución negativa de ecuación 19 de segundo grado.

$$aD^2 + bD + c = 0 \quad (19)$$

Donde los coeficientes se definen mediante ecuaciones 20.

$$\begin{aligned} a &= R_o(V_g - V_o + V_D) + V_o(R_{C1} - R_{L1} - R_{L2}) \\ b &= V_o(2R_o - R_{on} - R_{C1} + 2R_{L2}) - R_o(V_g + 2V_D) \\ c &= R_o(V_D - V_o) - V_oR_{L2} \end{aligned} \quad (20)$$

El nuevo valor del ciclo de trabajo  $D$  será igual a 0.613, equivalente a un tiempo en alto del 61.3% del periodo de la señal control.

### Diseño de controlador

Para controlar el convertidor Ćuk se utilizó el circuito integrado PWM de propósito general TL494. Este chip incorpora todas las funciones requeridas para implementar un control PWM en modo voltaje. Incluye dos amplificadores de error, un oscilador ajustable, un generador de tiempo muerto, un regulador de 5 V de precisión, entre otras características [7].

Con los valores mostrados en la tabla 1 es posible determinar las funciones de transferencia Control-Salida de la ecuación 13. Sin embargo, la carga del convertidor estará dividida en dos partes: el luminario LED y una resistencia de sensado de corriente de  $0.6 \Omega$  como lo muestra la figura 4, dando una resistencia total de  $77.6 \Omega$ .

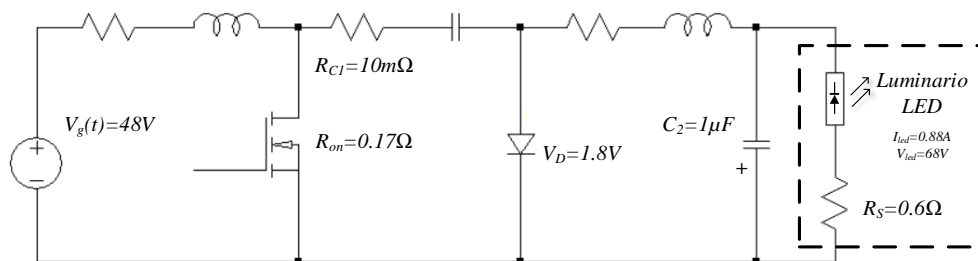


Figura 4 Carga del convertidor Ćuk.

De tal forma, la función de transferencia utilizada para cerrar el lazo de control con el TL494 es la que define la relación del voltaje sobre la resistencia de sensado con la señal de control  $\hat{d}(s)$ , la cual se muestra en ecuación 21.

$$\frac{\hat{v}_{sens}(s)}{\hat{d}(s)} = -\left(\frac{0.6}{77.6}\right) \frac{4.9392 \times 10^{45} s^2 - 2.6059 \times 10^{50} s + 6.7542 \times 10^{54}}{4.6899 \times 10^{34} s^4 + 7.8204 \times 10^{38} s^3 + 1.4446 \times 10^{44} s^2 + 1.5565 \times 10^{48} s + 2.6618 \times 10^{52}} \quad (21)$$

El voltaje presente en la resistencia de sensado es proporcional a la corriente que circula a través de la carga, de ésta forma el control tratará hacer que el voltaje

senado esté siempre en el mismo valor, el cual se puede determinar por ecuación 22.

$$V_{sens} = Vref = R_S * I_o = (0.6 \Omega)(0.88 A) = 0.528 V \quad (22)$$

En la figura 5 se muestra el esquema de control en lazo cerrado para el convertidor Ćuk.

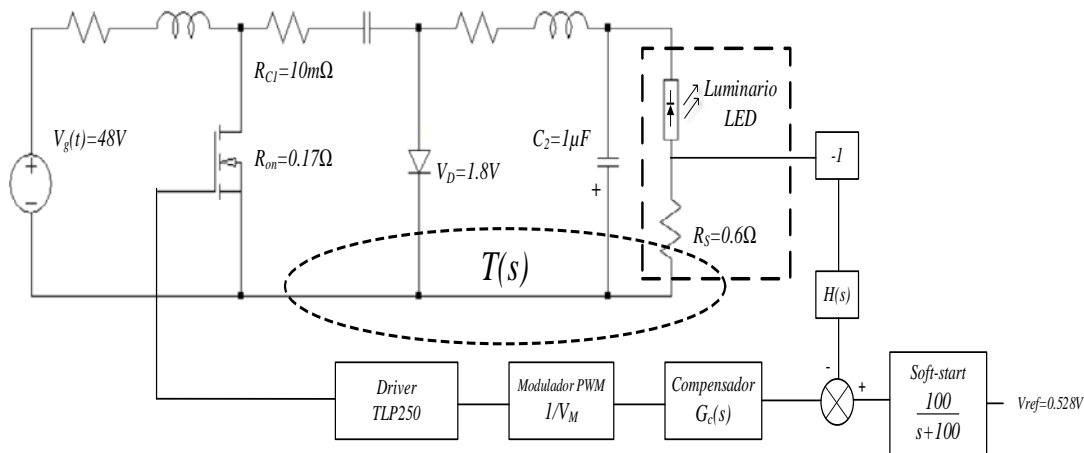


Figura 5 Esquema de control.

Dado que el voltaje de salida en este convertidor es negativo, es necesario agregar un inversor para cambiar la polaridad del voltaje sentido. Este voltaje entrará a un bloque  $H(s)$  cuya finalidad es atenuar el ruido de conmutación de alta frecuencia y quedarse únicamente con la componente de CD del voltaje sentido, posteriormente pasará a un amplificador de error del TL494 y se lo restará al voltaje de referencia obtenido con ecuación 22; dicha diferencia entrará al compensador  $G_c(s)$  el cual ejecutará la acción de control por diseñar. Finalmente, la señal de control entrará al modulador PWM del TL494 para modificar el ciclo de trabajo  $D$  y a la salida de éste se tendrá un optoacoplador con salida Push-Pull (TLP250) para impulsar el transistor MOSFET. El bloque  $H(s)$  es un filtro pasa-bajas  $RC$  de primer orden con  $R=1 \text{ k}\Omega$  y  $C=1 \mu\text{F}$ , el cual exhibe una frecuencia de quiebre a los 159 Hz y su función de transferencia está dada mediante ecuación 23.



$$H(s) = \frac{1000}{s + 1000} \quad (23)$$

En el esquema de control  $V_M$  es la amplitud de la señal diente de sierra del modulador PWM del TL494, cuyo valor es igual 3 V; por otra parte, el driver TLP250 se puede considerar como una ganancia unitaria.

De tal modo, ya se conocen todos los elementos necesarios para determinar la función de transferencia de lazo abierto  $T(s)$  sin compensar, es decir con  $G_c(s) = 1$ , como se muestra en ecuación 24.

$$T(s) = -\frac{\hat{v}_{sens}(s) H(s)}{\hat{d}(s) V_M} G_c(s) = \quad (24)$$

$$= \frac{1.273 \times 10^{46} s^2 - 6.716 \times 10^{50} s + 1.741 \times 10^{55}}{4.69 \times 10^{34} s^5 + 8.289 \times 10^{38} s^4 + 1.452 \times 10^{44} s^3 + 1.701 \times 10^{48} s^2 + 2.817 \times 10^{52} s + 2.662 \times 10^{55}}$$

En la figura 6 se muestra el diagrama de Bode de magnitud y fase de la función  $T(s)$  sin compensar.

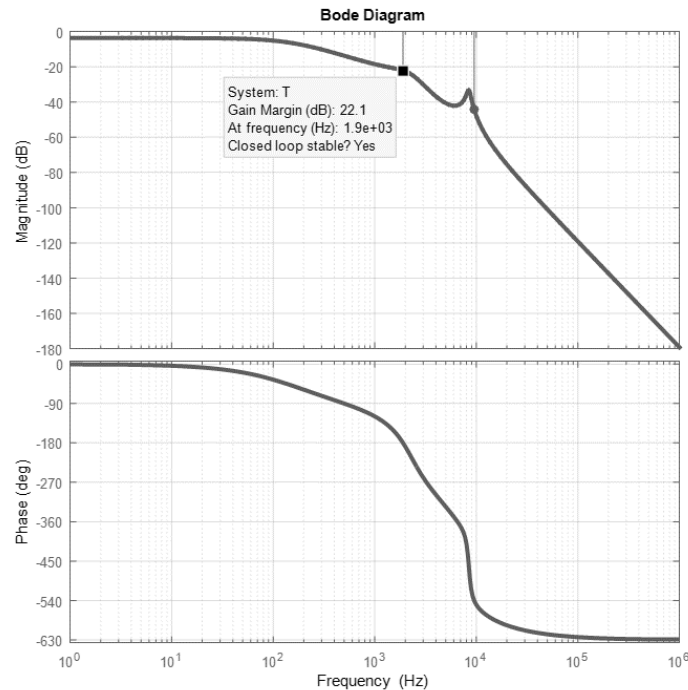


Figura 6 Diagrama de Bode de magnitud y fase del sistema sin compensar.

Como se puede apreciar en la figura 6, el sistema tiene un margen de ganancia de 22.1 dB cuando la fase cruza por  $-180^\circ$ , lo cual ocurre aproximadamente a los

1900 Hz, sin embargo, no existe margen de fase debido a que la magnitud siempre está por debajo de los 0 dB. Dicho esto, el convertidor Cúk requiere de un compensador que proporcione magnitud en baja frecuencia que permita la aparición de un margen de fase y no modifique la característica de margen de ganancia del sistema sin compensar. Para lograr tal objetivo es necesario agregar un cero invertido con una frecuencia de quiebre menor a los 1900 Hz, una propuesta razonable es colocar el cero invertido a los 400 Hz. La función de transferencia del compensador propuesto se determina mediante ecuación 25.

$$G_c(s) = 1 + \frac{2\pi f_L}{s} = 1 + \frac{2\pi(400 \text{ Hz})}{s} = \frac{s + 2513.3}{s} \quad (25)$$

En la figura 7 se muestra el diagrama de Bode de magnitud y fase del convertidor agregando a  $T(s)$  el término de compensación  $G_c(s)$ , obteniendo así, un margen de fase de casi  $59^\circ$  y un margen de ganancia de 21.2 dB, lo cual asegura la estabilidad del convertidor en lazo cerrado.

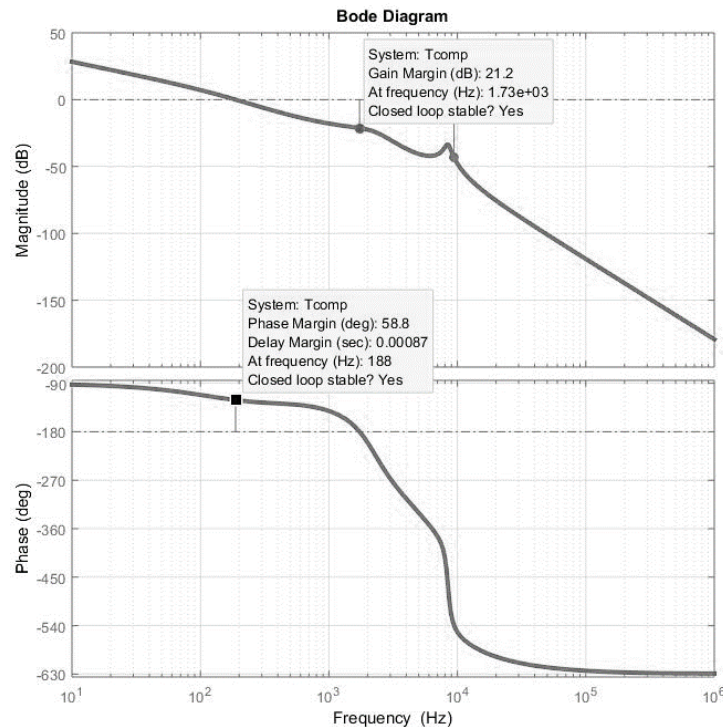


Figura 7 Diagrama de Bode de magnitud y de fase del sistema compensado.

### 3. Resultados

En la figura 8 se muestra el convertidor Ćuk implementado físicamente con los componentes descritos a lo largo del documento y el luminario LED CUBIC SOFT utilizado en la figura 9.

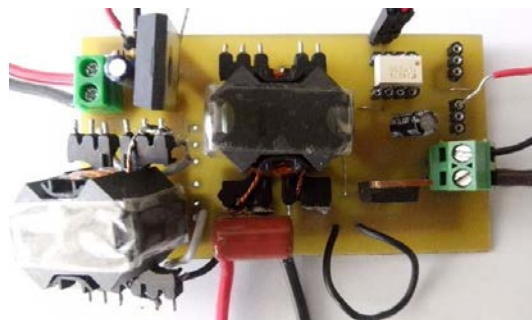


Figura 8 Convertidor Ćuk físico.



Figura 9 Luminario LED CUBIC SOFT 60 x 120 cm 60 W.

Así mismo en las figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran las formas de onda de voltaje en los capacitores y las corrientes en cada uno inductores del convertidor. Las ondas de color azul son las obtenidas de manera experimental y las de color rojo son las que se obtuvieron de una simulación realizada en el programa PSIM.

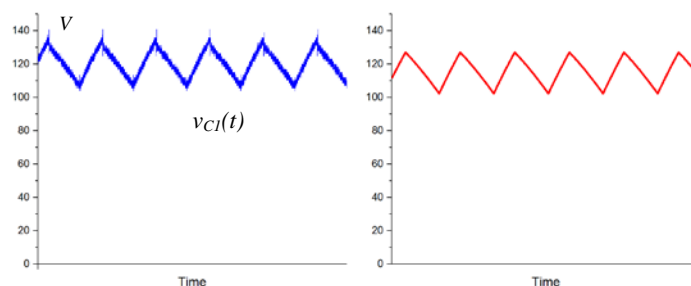


Figura 10 Voltaje en el capacitor  $C_1$ .

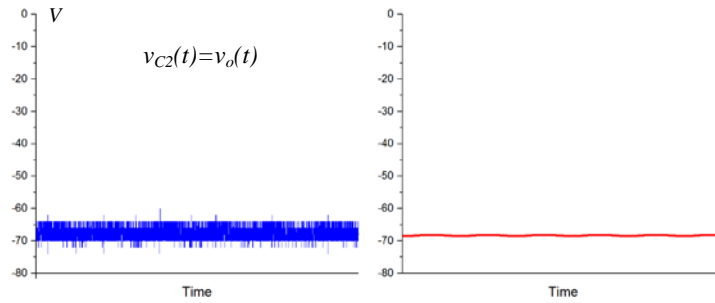


Figura 11 Voltaje en el capacitor  $C_2$ .

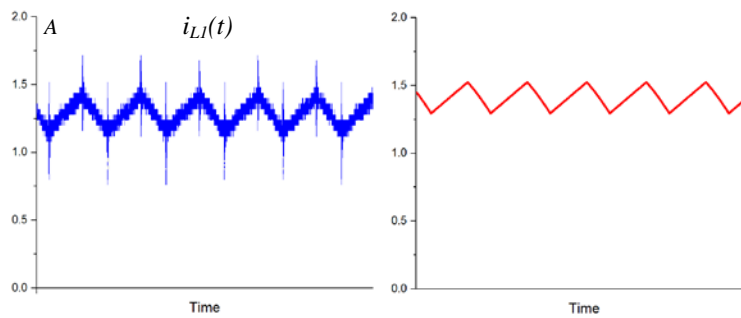


Figura 12 Corriente en el inductor  $L_1$ .

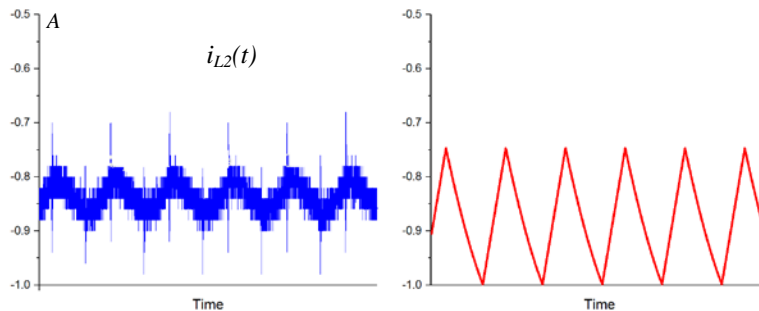


Figura 13 Corriente en el inductor  $L_2$ .

#### 4. Conclusiones

El desarrollo del modelo matemático para un convertidor Cúk con todos los elementos no ideales (parásitos) resultó funcionar adecuadamente y por ende, queda como base para futuros trabajos en el área. Es importante resaltar que en el análisis realizado no se incluyó la resistencia serie asociada del capacitor de salida, ya que el convertidor en su versión final llevará capacitor de película de

polipropileno con una muy baja resistencia, por lo cual se puede despreciar. Así mismo, las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio demuestran una gran similitud con lo obtenido mediante una simulación realizada en PSIM, las diferencias existentes son debidas a que la referencia del control estaba por debajo de la referencia obtenida en el análisis presentada en este trabajo. Se agradece al CONACYT-SENER por su apoyo a través del proyecto 233755 "Laboratorio en micro-redes de CD".

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] A. Nachez, *Electrónica de Potencia, Aplicaciones de la conversión CC-CC, Convertidor de Cúk*. Universidad Nacional de Rosario.
- [2] R. Antonio, J. Arau, "Evaluation of Boost, Sepic and Cuk Topologies as Power Factor Correction Stage in Electronic Ballast Applications". CENIDET. 1994.
- [3] S. S. Ang, "Power-Switching Converters". State-Space Averaging. Pág. 192.
- [4] Ficha técnica luminario LED CUBIC SOFT 60 x 120 60 W, [http://archivos.magg.com.mx/fichas/L5555\\_.pdf](http://archivos.magg.com.mx/fichas/L5555_.pdf).
- [5] International Rectifier, "SMPS MOSFET", IRFB17N20D datasheet. <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfb17n20dpbf.pdf>.
- [6] CREE, "Silicon Carbide Schottky Diode", C3D20060D datasheet. <http://www.wolfspeed.com/media/downloads/100/C3D20060D.pdf>.
- [7] Texas Instruments, "Pulse-Width-Modulation Control Circuits", TL494 datasheet. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>.

## 6. Autores

Francisco Alejandro Juárez León. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya. Sus áreas de interés incluyen el diseño e implementación de sistemas digitales, modelado matemático de convertidores CD-CD y sus cuestiones prácticas. Actualmente está realizando sus residencias profesionales en el Laboratorio de Energías Renovables en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Elías José Juan Rodríguez Segura. Recibió el grado de Ingeniero en el año de 1994 por parte de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM-Azcapotzalco), Ciudad de México, el grado de Maestro en Ciencias en el año 1996 y el grado de Doctor en 1999 por parte del Centro Nacional de e Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca Mor., México, todos en Ingeniería Electrónica. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Celaya. Sus áreas de interés incluyen la conversión de energía de alta frecuencia, rectificadores de alto factor de potencia y balastos electrónicos.

# IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA ESCALAR SPWM EN UN SISTEMA DE BAJO COSTO

***Francisco Juárez León,***

Instituto Tecnológico de Celaya

*f.ale\_juarez@hotmail.com*

***Francisco Pérez Pinal***

Instituto Tecnológico de Celaya

*francisco.perez@itcelaya.edu.mx*

***Luis Capilla Castillo***

Instituto Tecnológico de Celaya

*luisadrian.lcc@gmail.com,*

***Heriberto Rodríguez Estrada***

Instituto Tecnológico de Celaya

*joheroedri@hotmail.com*

## **Resumen**

En este artículo se presenta la implementación de la técnica de modulación escalar SPWM en un sistema de bajo costo. El hardware desarrollado se compone de un PIC16F1938, tres drivers IR2302, una pantalla LCD Nokia 5110 y cinco botones empleados en la interfaz de usuario. Para la validación del sistema se realizaron pruebas a lazo abierto con un motor de inducción jaula de ardilla de 4 polos de 0.2 kW conectado a un módulo inversor trifásico LabVolt. Así mismo, el sistema cuenta con una interfaz gráfica amigable al usuario que le permite modificar parámetros tales como: *frecuencia, sentido de giro y habilitar o deshabilitar señales de control*. El sistema desarrollado a su vez, puede ser utilizado para implementar otras técnicas de modulación de manera sencilla y económica.

**Palabras Claves:** Bajo costo, inversor trifásico, LabVolt, SPWM.

## **1. Introducción**

Actualmente, existen diversas técnicas de modulación para el control de convertidores CD-CA, comúnmente denominados inversores [1]. Éstas técnicas pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: técnicas de control escalar y de control vectorial [2]. En las técnicas de control escalar, como la SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), el inversor puede ser operado sin la necesidad de establecer una retroalimentación al sistema de control, a diferencia de las técnicas de control vectorial, que requieren retroalimentar ciertas variables para operar adecuadamente. La modulación senoidal, en sus diferentes formas, es un tipo de control escalar, ya que su funcionamiento se basa en la comparación de ondas o bien de valores previamente creados en algún sistema digital. Por otro lado, los controles por modulación vectorial se fundamentan en que un vector espacial representa a un sistema trifásico simétrico y balanceado, de variación senoidal a través del tiempo, y por tanto no se implementa por comparación de ondas o valores, sino que los algoritmos desarrollados son capaces de identificar a dicho vector en cada instante.

Una de las ventajas más importantes de las técnicas de control escalar es la facilidad con la cual se pueden implementar, ya sea de forma analógica o digital. Sin embargo, están limitadas a aplicaciones donde no es importante la respuesta dinámica ni una gran precisión en el control del torque o la velocidad (en el caso de que la carga sea un motor). En cambio, el control por modulación vectorial provee un mayor control de dichas variables, aunque para poder implementar un control de este tipo, generalmente es requerida una etapa de sensado y una etapa de acondicionamiento de señal para poder operar.

Este artículo presenta el desarrollo de un sistema SPWM a lazo abierto de bajo costo, el cual permite controlar la velocidad de un motor de inducción conectado a un inversor trifásico. En la sección 2 se describe a grandes rasgos el desarrollo del sistema de control, partiendo de los componentes utilizados para éste, el algoritmo implementado en el microcontrolador y finalmente el armado físico. Posteriormente la sección 3, detalla las tres pruebas realizadas para evaluar el sistema propuesto y finalmente, en la sección 4 se reportan las conclusiones de éste trabajo.



## 2. Desarrollo

### Componentes del sistema de bajo costo

En la figura 1 se muestra el diagrama a bloques del sistema desarrollado para el manejo del inversor trifásico. Puede observarse que consta principalmente de cinco secciones importantes: un microcontrolador PIC16F1938, tres drivers IR2302, una pantalla LCD Nokia 5110, una interfaz de usuario compuesta por cinco botones y una interfaz de programación.

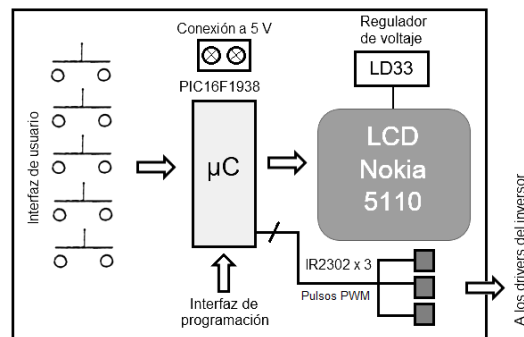


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema de bajo costo.

El microcontrolador PIC16F1938 de la marca Microchip es un integrado de 28 pines de muy bajo consumo de energía que se eligió debido a que cuenta con tres módulos hardware PWM (ECCP) y puede trabajar hasta una frecuencia de 32 MHz; lo cual asegura una excelente velocidad de ejecución de las instrucciones [3]. El diseño del programa se realizó en *mikroC PRO for PIC*, el cual cuenta con librerías integradas para ciertos recursos hardware del propio microcontrolador facilitando significativamente el manejo de los mismos.

El IR2302 es un driver de 8 pines de la empresa International Rectifier capaz de manejar dos interruptores de forma complementaria utilizando únicamente una señal de control. Este chip además agrega un tiempo muerto fijo de 540 ns a las señales de activación a su salida. Cuenta con un pin de protección SD (shutdown) para desactivar ambos interruptores al mismo tiempo y así evitar algún percance en la etapa de potencia [4]. En figura 2 se muestra un diagrama de tiempo que muestra el funcionamiento de éste integrado.

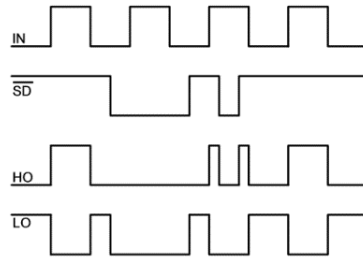


Figura 2 Diagrama de tiempo entrada/salida IR2302.

El display LCD gráfico Nokia 5110 es una pequeña pantalla monocromática de 84 x 48 pixeles que por su tamaño, resulta ideal para algunas aplicaciones donde se requiere exhibir cierta cantidad de información de manera portátil, que en un LCD convencional de 16 x 2 cuesta trabajo. Esta pantalla trabaja con comunicación del tipo SPI (Serial Peripheral Interface), por lo cual, requiere pocas líneas de comunicación con el microcontrolador. Así mismo, este periférico necesita de un voltaje de alimentación de 3.3 volts, para lo cual, el sistema incluye un regulador lineal LD33. En figura 3 se muestran las dimensiones del display y una descripción de cada uno de sus pines.

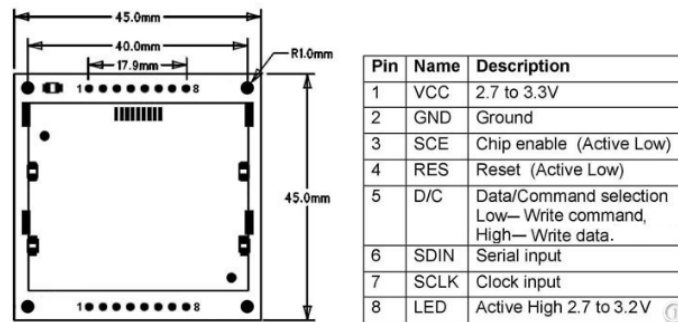


Figura 3 Display LCD Nokia 5110.

Para la interfaz de usuario se consideraron cinco botones pulsadores. El primer botón tiene la función de encendido y apagado general, el segundo permite activar o desactivar las señales SPWM con lo cual se encendería o apagaría el motor trifásico. Los botones tres y cuatro son para disminuir y aumentar la frecuencia de la señal sintetizada a la salida del inversor desde 1 hasta 60 Hz en pasos de 1 Hz. El quinto botón permite hacer un cambio de giro siempre y cuando el motor se encuentre apagado.

Dado que el microcontrolador utilizado en el sistema es de montaje superficial se añadió un puerto extra en la tarjeta como interfaz de programación, donde de manera muy sencilla se puede conectar un programador como el Pickit3 de la marca Microchip y cargar el programa al integrado.

### Algoritmo del sistema de control

En figura 4 se muestra el diagrama de flujo del programa elaborado para el microcontrolador. En primera instancia se hace la configuración de los puertos, se inicializa el display LCD y se habilitan las interrupciones para el manejo de la interfaz de usuario. Para la ejecución del programa se establecieron 4 bits importantes:

- *on\_off\_general*: este bit determina el estado de la tarjeta de control. Si éste tiene un valor igual a '0' la tarjeta estará apagada y el display se mostrará inactivo. Si el bit toma el valor de '1' el display se encenderá y el usuario podrá controlar el inversor trifásico.
- *run\_stop*: este bit determina el estado de las señales de control para el inversor. Si éste vale '0' las señales no estarán presentes a la salida de los IR2302, en cambio, si toma el valor de '1' se habilitarán dichas salidas.
- *rotation*: bit de rotación. Si *rotation* = '0' las señales trifásicas estarán en un orden A, B y C, de otro modo, si *rotation* = '1' estarán en un orden A, C y B con lo cual se consigue invertir el sentido de rotación del motor de inducción.
- *bit\_actualizacion*: este bit le indica al algoritmo si es necesario actualizar la información mostrada en el display LCD.

Para generar las señales SPWM se agregó al programa una tabla de 256 elementos con los valores de la función seno en un periodo de 0 a  $2\pi$ . Debido a que el inversor es trifásico, se crearon además tres punteros desfasados 120 grados uno con respecto del otro (*i*, *j* y *k*), así, con los valores de la tabla senoidal y los punteros se hace un barrido completo en un tiempo *t* para sintetizar un ciclo completo de la señal de salida.

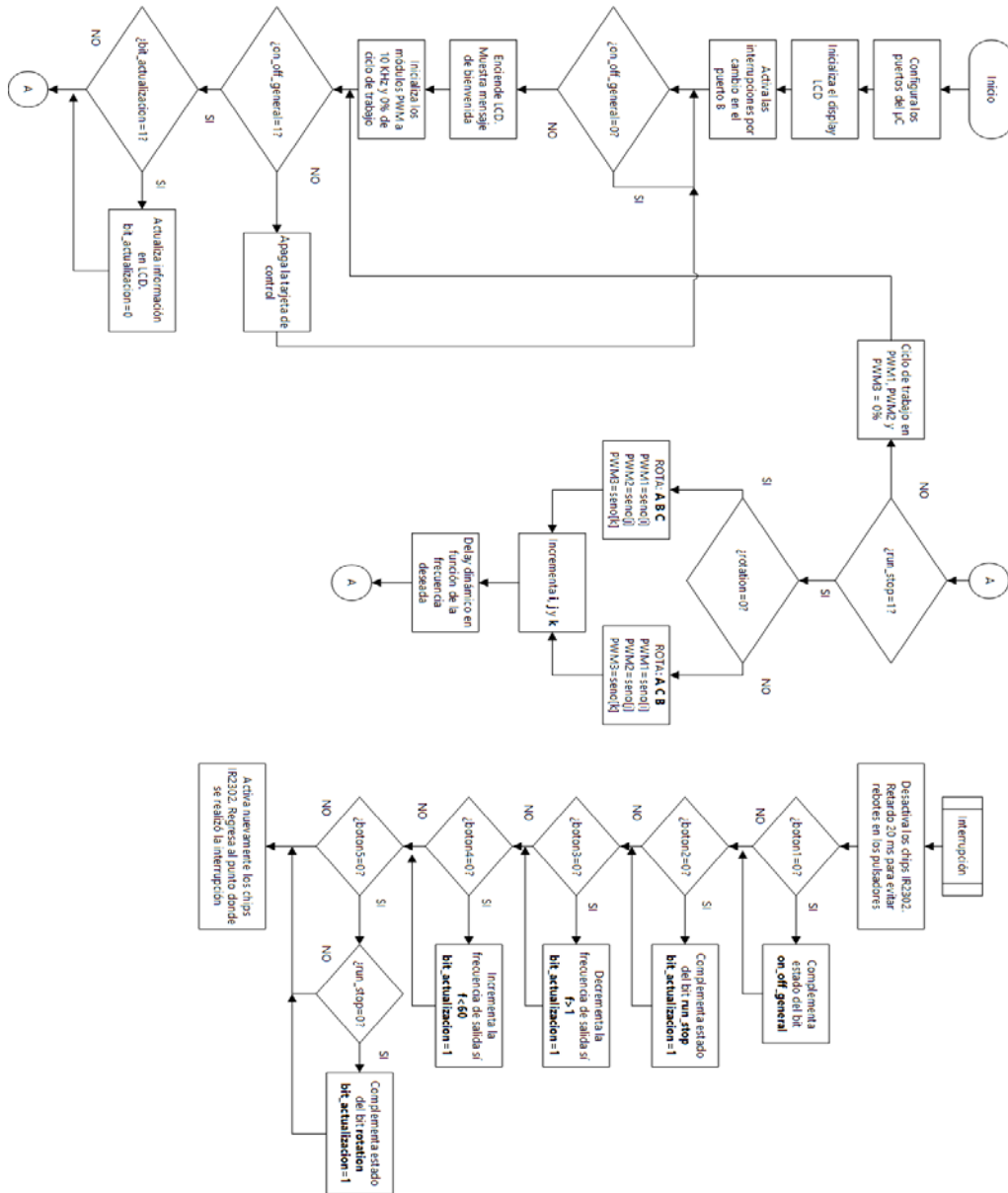


Figura 4 Diagrama de flujo del algoritmo desarrollado.

### Implementación física

Para implementar de manera física el sistema de control de bajo costo se realizó el diseño de un PCB de dos caras mediante el programa Altium Designer. En las figuras 5 y 6 se muestran cada una de las caras de la placa diseñada.

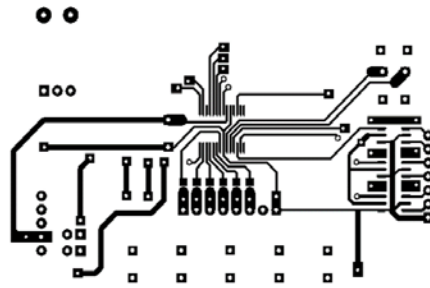


Figura 5 Cara superior del PCB.

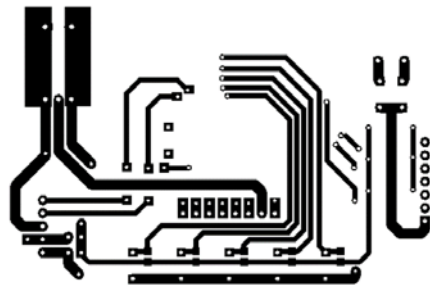


Figura 6 Cara inferior del PCB.

En la figura 7 y 8 se muestra el prototipo final del sistema de control con y sin display LCD.

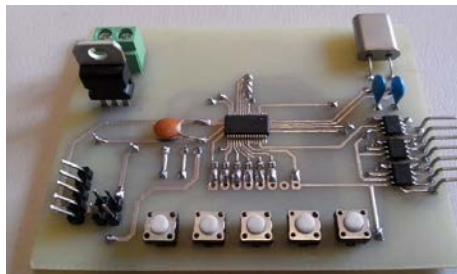


Figura 7 Prototipo final sin display LCD.

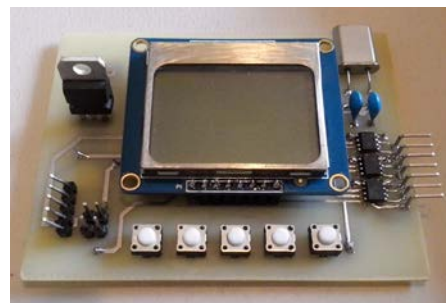


Figura 8 Prototipo final con display LCD.

Como se puede apreciar, el sistema en su totalidad tiene un tamaño reducido, lo que significa que puede ser utilizado en otras aplicaciones que requieran cierto grado de portabilidad. Una vez armado el prototipo final, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento antes de conectarlo a la etapa de potencia.

En la figura 9 se muestra el sistema de control al ser energizado y en la figura 10 la información de estado del motor, velocidad, frecuencia y sentido de giro.

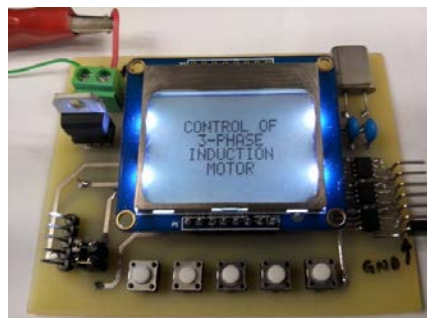


Figura 9 Pantalla de inicio.



Figura 10 Información del sistema de control.

Para finalizar, se revisó que los pulsos de salida estuvieran presentes y exhibieran un desfase de  $120^\circ$ . En figura 11 se muestran los pulsos correspondientes para dos ramas consecutivas del inversor trifásico obtenidas con un osciloscopio Tektronix de 4 canales.

### 3. Resultados

Finalmente, se realizaron tres pruebas diferentes utilizando un módulo de inversor trifásico del equipo de LabVolt del Laboratorio de Electrónica del Instituto

Tecnológico de Celaya (figura 12). La primera de las pruebas se realizó conectando una carga resistiva en conexión estrella a la salida del inversor; la segunda en agregar inductancia a cada una de las salidas del inversor para filtrar la señal y finalmente, la tercer prueba consistió en conectar el motor de inducción trifásico de jaula de ardilla y ver su funcionamiento en condiciones nominales de operación.

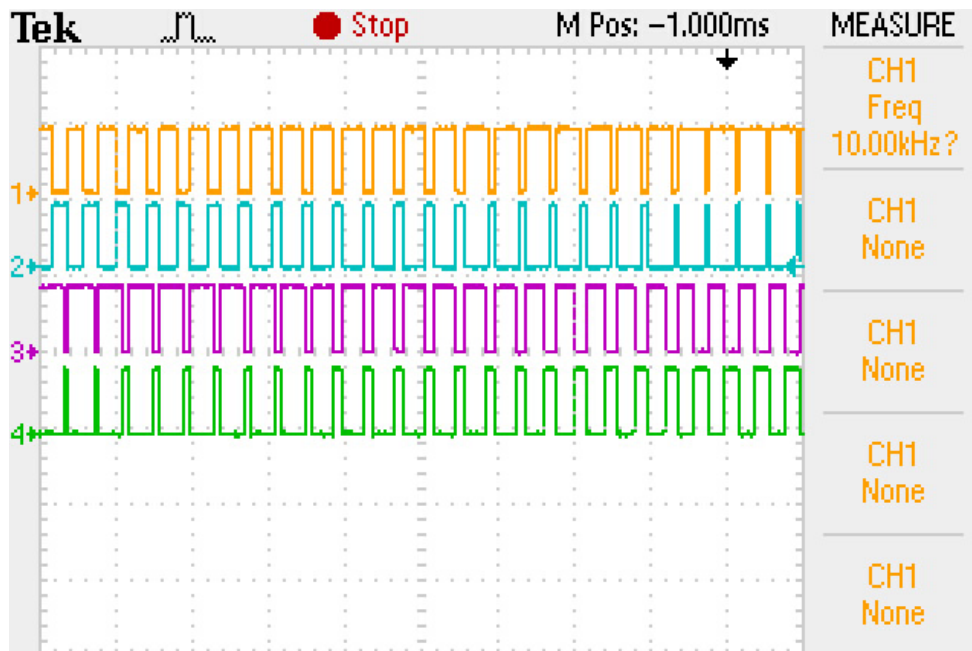


Figura 11 Pulsos de disparo para dos ramas del inversor trifásico.

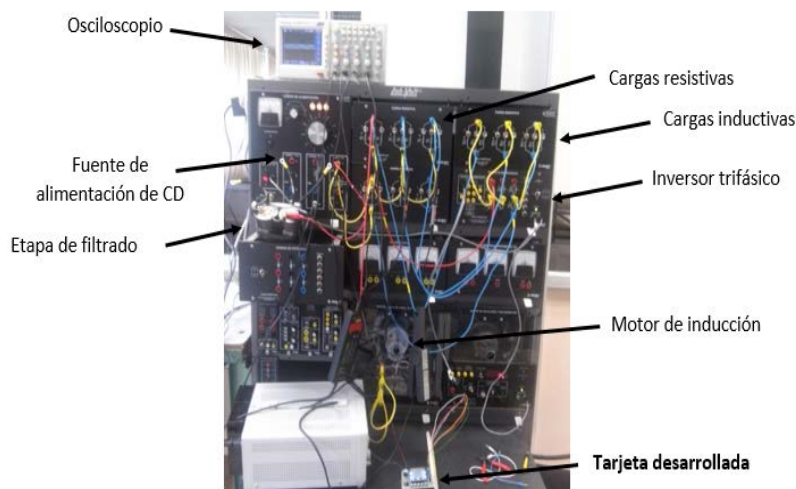


Figura 12 Módulo LabVolt.



## Carga resistiva

Para esta prueba de funcionamiento se utilizaron tres resistencias de  $1200 \Omega$  conectadas en estrella a la salida del inversor. En la figura 13 se puede observar el voltaje de fase en cada una de las resistencias, se puede apreciar que las formas de onda presentan un desfaseamiento correcto de  $120^\circ$  una con respecto de la otra.



Figura 13 Voltaje en cada una de las fases.

## Carga resistiva con inductancia de filtrado

Para obtener formas de onda casi senoidales, se agregó un inductor de 3.2 mH en serie con cada una de las salidas del inversor trifásico, empleando la misma carga resistiva de la prueba 1. En la figura 14 se muestra el voltaje de fase en cada una de las resistencias, cada una con una frecuencia de aproximadamente 59 Hz.



Figura 14 Señales de voltaje después del filtro (59 Hz).



Así mismo se realizaron pruebas a 20 Hz y 30 Hz. En las figuras 15 y 16 se muestran las formas de onda obtenidas para cada caso.



Figura 15 Señales a 20 Hz.



Figura 16 Señales a 30 Hz.

### Motor de inducción trifásico de jaula de ardilla

Cómo prueba final, se conectó un motor de inducción trifásico de jaula de ardilla en estrella a la salida del inversor. Las características de este motor son las siguientes: 175 W, 1.2 A de corriente nominal, 120/208 V, 60 Hz. En ésta prueba se modificaron ciertos parámetros para observar su comportamiento, tales como: voltaje de entrada, frecuencia de salida, sentido de giro, etc. En la figura 17 se muestra el voltaje en cada uno de los devanados del motor de trifásico y en la figura 18 el voltaje y corriente en una de las fases.

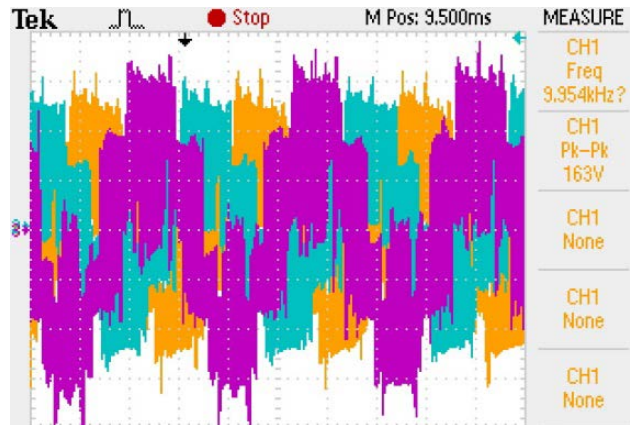


Figura 17 Voltaje en cada uno de los devanados del motor.

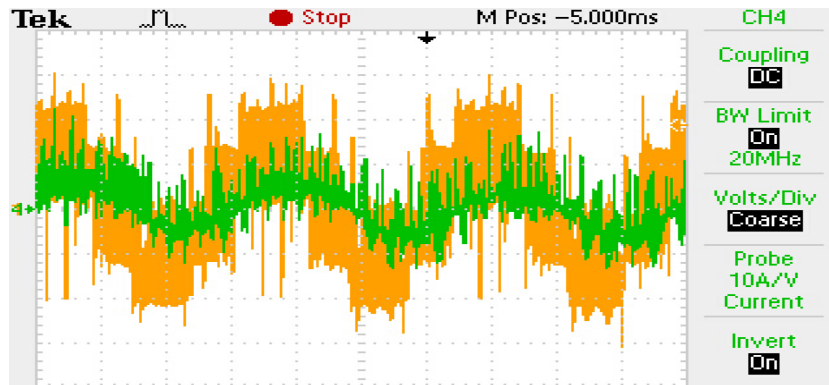


Figura 18 Voltaje y corriente en una de las fases.

### Costo del sistema

En tabla 1 se reporta el costo de cada uno de los elementos requeridos para el sistema presentado. Como se puede observar el costo total de los componentes no supera los \$500, por lo que es posible afirmar que se trata de un sistema de muy bajo costo de características competitivas.

### 4. Conclusiones

Este artículo ha reportado la implementación del SPWM en una tarjeta diseñada desde cero de bajo costo. Diversas pruebas experimentales del sistema desarrollado, conectado a un inversor y motor de corriente alterna comercial, han sido reportadas. El sistema es capaz de cambiar la velocidad del motor variando la frecuencia de salida de la fundamental mediante el uso de un par de botones y

una interfaz gráfica con el usuario. El sistema desarrollado, tiene la versatilidad de implementar otros esquemas de modulación modificando su programación. Estos esquemas serán desarrollados en un futuro y reportados en siguientes publicaciones.

Tabla 1 Costo del prototipo.

Elemento	Costo Unitario	Cantidad	Subtotal
PIC16F1938-I/SS	\$57	1	\$57
LD33	\$37	1	\$37
IR2302	\$72	3	\$216
Push button NA	\$3	5	\$15
Display Nokia 5110	\$100	1	\$100
Cristal de cuarzo 8 MHz	\$7	1	\$7
Resistor 10KΩ SMD	\$1	11	\$11
Tira de pines	\$9	1	\$9
Capacitor 22 pF	\$3	2	\$6
Terminal block	\$5	1	\$5
Placa fenólica 10 x 10 cm	\$9	1	\$9
<b>TOTAL</b>			<b>\$472</b>

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] F. J. Gimeno Sales, S. Seguí Chilet, S. Orts Grau, Convertidores electrónicos: Energía solar fotovoltaica, aplicaciones y diseño. 2002. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. ISBN: 849705-177-7.
- [2] Á. Vernavá, R. Gibbons, Control escalar del motor asíncrono (SPWM). Electrónica de Potencia, Universidad Nacional de Rosario
- [3] Microchip, “20/40/44-Pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers”, PIC16F1938 datasheet.
- [4] International Rectifier, “HALF-BRIDGE DRIVER”, IR2302 datasheet.

## 6. Autores

Francisco Alejandro Juárez León. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya. Sus áreas de interés incluyen

el diseño e implementación de sistemas digitales, modelado matemático de convertidores CD-CD y sus cuestiones prácticas.

Dr. Francisco Javier Pérez Pinal. Dr. Francisco J. Pérez-Pinal, ha laborado como profesor investigador en instituciones como McMaster University (Canadá), Mohawk College of Applied Arts and Technology (Canadá), Universidad Politécnica de Pachuca (México), Instituto Politécnico Nacional (México), y el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (México). Ha realizado estancias de investigación en Manchester University (UK) y el Illinois Institute of Technology (USA). Actualmente es autor de un libro, y es autor/co-autor de más de cuarenta artículos en revistas y/o congresos internacionales. Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1, CONACyT (2015) Primer lugar, Mejor Tesis Doctoral, área de eficiencia energética, IIE, CFE, FIDE, México (2009). Premio Nacional de Energía Renovable, área de innovación, Secretaria de Energía, SENER, México (2008). Becario COMEXUS-Fulbright Garcia-Robles, (2006). Ha dirigido/co-dirigido doce proyectos científicos y tecnológicos nacionales/extranjeros relacionados con la industria aeronáutica, automotriz y energía eléctrica con un monto total acumulado de cuatro millones de dólares.

Luis Adrián Capilla Castillo. Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica así como el de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, Guanajuato, México, en 2008 y 2014 respectivamente. Desde 2015 colabora en investigaciones sobre convertidores de potencia en el laboratorio de energías renovables del Instituto Tecnológico de Celaya.

Heriberto Rodríguez Estrada. Obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica en 2002 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en 2006, ambos por parte del Instituto Tecnológico de Celaya. En 2012 obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y actualmente colabora con proyectos referentes a energías renovables y calidad de la energía en el Laboratorio de Energías Renovables del Instituto Tecnológico de Celaya, Ha publicado un par de artículos de congreso y uno de revista.

# DISEÑO DE UN ACELERÓMETRO PARA MONITOREO SÍSMICO

***Jorge Rodolfo Santalucía Ríos***

Instituto de Investigaciones Antisísmicas, Universidad Nacional de San Juan Argentina

*jrsanta@unsj.edu.ar*

***Leonardo Gastón Montero Flores***

Instituto de Investigaciones Antisísmicas, Universidad Nacional de San Juan Argentina

*leomontero2004@yahoo.com.ar*

## Resumen

El Instituto de Investigaciones Antisísmicas” (IDIA) tiene entre sus objetivos el análisis del efecto que produce un evento sísmico en las construcciones (Ingeniería Sismo Resistente). Si bien en el mercado mundial existen instrumentos apropiados, resulta de interés institucional disponer de moderno instrumental de diseño propio y bajo costo que contribuya al logro de este objetivo. El presente trabajo describe los avances logrados en el desarrollo de un Proyecto de Investigación, cuyo propósito es el diseño y construcción de un acelerómetro para monitorear, detectar y registrar la actividad sísmica local. Además, este acelerómetro constituye la base principal para ser usado en una red de sensores inalámbricos para monitoreo sísmico de estructuras, vinculándolos con transceptores RF de bajo costo y con la posibilidad de acceso a Internet.

**Palabras Claves:** Acelerómetro, memoria SD, microcontrolador, RF.

## 1. Introducción

Los eventos sísmicos se han convertido en los últimos años en uno de los fenómenos naturales destructivos más frecuentes y, a pesar de grandes esfuerzos de investigación realizados por la comunidad sismológica mundial

durante años, aún no se ha logrado avanzar con rigor científico en el campo de la predicción de terremotos [1].

Prácticamente todos los países tienen organismos específicos que administran una red de acelerómetros de banda ancha para registrar y estudiar la actividad sísmica regional, generalmente complementados por “Sistemas de Alerta Temprana” con el propósito de proteger a la población y mitigar los daños provocados por esos fenómenos.

Entre estos Organismos podemos citar al Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) en Argentina [1], Sistema Sismológico Nacional en México [2] y Centro Sismológico Nacional en Chile [3] entre los más destacados.

Una Red Sismológica Nacional consiste en un sistema de estaciones sismológicas instrumentadas con acelerómetros de gran rango dinámico (y elevado costo) ubicadas estratégicamente en su territorio, que registra los movimientos sísmicos y transmite vía satélite la información a un moderno centro de computación de datos. Con esta red se dispone de manera casi instantánea el lugar donde ha ocurrido un sismo, su magnitud y profundidad, y provee importante información para conocer las características geológicas de la región [3].

Por otra parte, en los últimos años se ha generado gran interés por la instrumentación de estructuras (edificios, puentes, etc) para conocer su comportamiento dinámico [4].

Este monitoreo en tiempo real permite detectar cambios en las características dinámicas de la estructura y, en consecuencia, identificar los daños producidos luego de un evento sísmico mediante el análisis de los registros de aceleración, ya que generalmente los daños están asociados a cambios en la frecuencia natural de la estructura [5].

Los datos adquiridos son de gran utilidad en la investigación de los efectos de los terremotos sobre las estructuras, cuyos resultados permiten mejorar el diseño de normas de construcción sismo-resistente.

Los avances tecnológicos en el desarrollo de sensores de aceleración, digitalizadores, procesadores y redes de comunicación inalámbrica, han

permitido el desarrollo de sistemas de bajo costo para monitoreo de estructuras [6, 7], por lo que paulatinamente se están instrumentando mayor cantidad de edificios en zonas de elevado riesgo sísmico,

La ciudad de San Juan, Argentina, se encuentra ubicada en una zona de intensa actividad sísmica, y fue destruida en 1944 por un terremoto de gran magnitud.

El “Instituto de Investigaciones Antisísmicas” (IDIA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Juan tiene entre sus objetivos el análisis del efecto que produce un evento sísmico en las construcciones, por lo que es necesario disponer de instrumental de bajo costo apropiado para realizar monitoreo de la actividad sísmica local, y para estudiar el comportamiento de estructuras civiles ante la ocurrencia de un sismo.

El presente trabajo describe el desarrollo realizado en el IDIA de un acelerómetro para registro de movimientos sísmicos fuertes, que además pueden configurar una red de sensores sísmicos vinculados en forma inalámbrica (Wireless Sensor Network ) [8].

Los sensores utilizados para el monitoreo sísmico son sensores de aceleración de tecnología MEMS [9], capacitivos, de bajo nivel de ruido y salida analógica, adosados a conversores ADC delta sigma de 24 bits.

La vinculación en red se realiza con transceptores RF de bajo costo. El sistema tiene la capacidad de acceso a Internet vía módem GSM/GPRS.

## **2. Acelerómetro para movimientos fuertes**

El acelerómetro está compuesto por diversos componentes que se irán describiendo (figura1).

Se utiliza como elemento sensor el acelerómetro triaxial Kionix KXR94-2283 [10], fabricado con tecnología MEMS (Microelectromechanical Systems), de alta sensibilidad y bajo ruido 45 ug/sqrt(Hz), que se puede calibrar estáticamente por gravedad y presenta un excelente desempeño en cuanto a bajo ruido, baja sensibilidad cruzada entre ejes y alta estabilidad ante variaciones térmicas en el segmento de acelerómetros MEMS de bajo costo [11, 12].

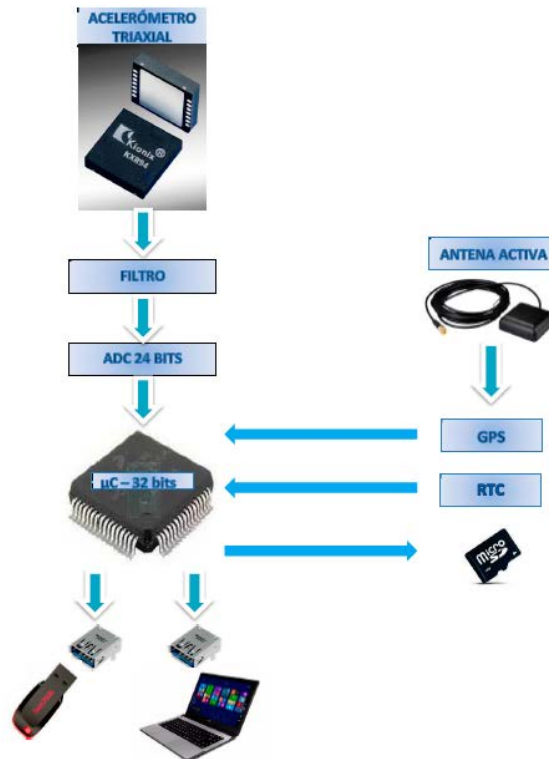


Figura 1 Esquema del Acelerómetro.

Las salidas analógicas del acelerómetro son filtradas y conectadas a un conversor analógico-digital delta-sigma de 24 bits (ADS1247) [13], controlado por un microcontrolador de 32 bits (MCF51JM128) [14] por medio del protocolo serie SPI.

El microcontrolador es la parte principal del sistema implementado. Además del control del conversor analógico-digital, controla la escritura de los datos de interés en una memoria tipo micro SD, normalmente de 2Gb, controla la configuración y lectura de datos de un módulo GPS externo, controla la comunicación con computadora externa mediante protocolo USB, y principalmente implementa un algoritmo inteligente de detección de sismos tal como se detalla en el próximo punto.

El acelerómetro se puede configurar por medio de un software instalado en la PC que se comunica por USB. La interface gráfica en PC permite configurar los principales parámetros del sistema, tales como tiempo de pre-evento, tiempo de post-evento, frecuencia de muestreo, valores de detección de umbral de disparo,



entre otros parámetros. Estos datos son almacenados en un archivo de configuración en la memoria SD, del cual el microcontrolador lee y ajusta sus parámetros de configuración.

La sincronización del sistema se puede programar para realizarla mediante un módulo GPS con antena activa que permite obtener con precisión la fecha y hora, o mediante un reloj de tiempo real (RTC) interno para ser usado en lugares donde no se reciba señal satelital del GPS (por ejemplo en túneles).

Este conjunto de componentes se encuentra alojado en un gabinete de aluminio reforzado, hermético y resistente a condiciones atmosféricas desfavorables (figura 2).



Figura 2 Acelerómetro.

### **3. Algoritmo de detección de sismos**

Existen diversos algoritmos de detección de eventos sísmicos. En este sistema se han implementado dos algoritmos: uno realiza la detección por nivel absoluto y otro se basa en el algoritmo de la relación entre el promedio de tiempo corto y el promedio de tiempo largo, conocido por las siglas en inglés STA/LTA (Short Time Average / Long Time Average).

El algoritmo de nivel absoluto es el más simple de implementar y se basa en iniciar el registro en memoria SD de las señales de aceleración una vez que se haya superado un nivel de umbral preestablecido. La desventaja de su utilización es que para señales sísmicas de baja intensidad, estas son enmascaradas por el ruido de fondo de origen humano o sísmico natural, por lo que este algoritmo es de utilidad solamente para movimientos sísmicos fuertes.

Un algoritmo más apropiado para la detección de eventos sísmicos es el algoritmo STA/LTA [15], cuya representación gráfica se observa a continuación (figura 3). En este algoritmo se calcula continuamente la media del valor absoluto de las señales de aceleración en dos ventanas de tiempo móviles.

La ventana del promedio de tiempo corto (STA) es sensible a los eventos sísmicos, mientras que la ventana de promedio de tiempo largo (LTA) brinda información sobre el ruido sísmico de fondo presente en el lugar de emplazamiento del sensor de aceleración.

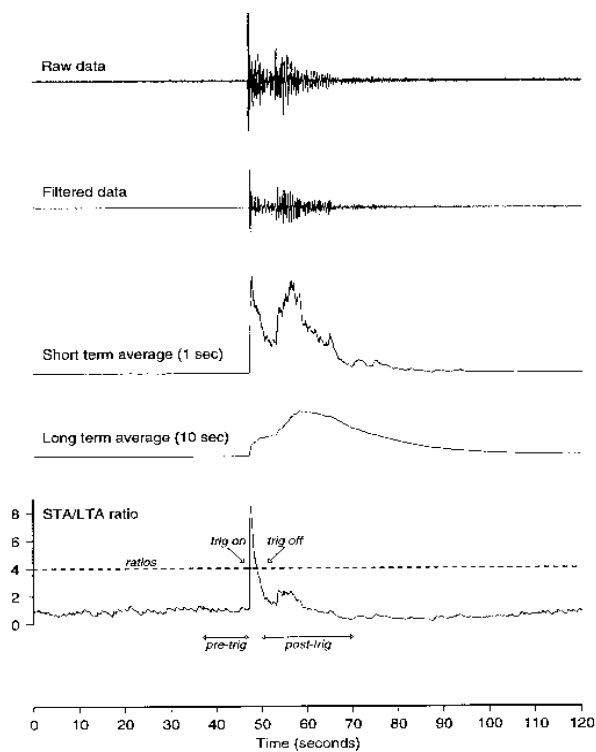


Figura 3 Detalle del algoritmo de detección STA/LTA.

De este modo, cuando la relación entre STA y LTA supera un valor preestablecido, configurable por el usuario, se declara la condición de evento sísmico en curso y se comienza el registro de las señales de aceleración en memoria SD, desde el tiempo de pre-evento establecido en la configuración del sistema.

Las señales provenientes de los sensores de aceleración se almacenan temporalmente en una memoria SRAM en forma cíclica, por medio de un buffer

circular. En cualquiera de los dos algoritmos descritos, una vez detectado el evento sísmico los datos que se almacenan en la memoria permanente, memoria SD, no son los datos de aceleración del momento de la detección, sino que se van almacenando los datos del buffer circular en la memoria SRAM.

Esto permite registrar los datos instantes antes de la detección del evento (tiempo de pre-evento, configurable por el usuario), por lo que se dispone información del sismo desde su inicio. Del mismo modo, desde el momento que se deja de detectar el sismo se registran los datos por un determinado tiempo adicional (tiempo de post-evento), que también es configurable por el usuario.

#### 4. Acelerómetros conectados en red

El acelerómetro descrito para monitoreo sísmico, con la incorporación de módulos transceptores RF, se puede usar para implementar una red de sensores sísmicos inalámbrica (Wireless Sensor Network (WSN) [8]), con la capacidad de acceso a Internet vía módem GSM/GPRS (figura 4).

Un sistema de estas características es muy útil para monitorear el comportamiento de una estructura (por ejemplo de un edificio) ante la ocurrencia de un evento sísmico.

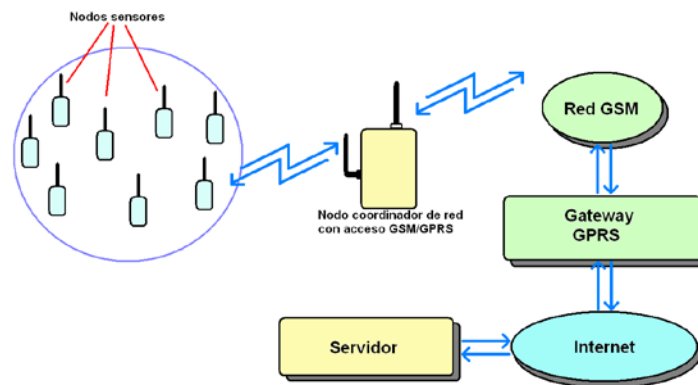


Figura 4 Esquema del sistema de red inalámbrica.

En este tipo de redes son muy importantes factores tales como disminución del consumo energético, escalabilidad, robustez frente a pérdida de parte de la red, como así también el bajo costo de los nodos que constituyen la WSN.

La red está compuesta por dos clases de nodos: nodos sensores con transceptores RF de bajo costo, y nodo coordinador de red RF con módulo GSM/GPRS incorporado.

Para el nodo sensor, a la arquitectura descrita anteriormente del acelerómetro se le agrega un módulo de radiofrecuencia, económico y de altas prestaciones. El módulo seleccionado para esta aplicación es el nRF24L01 [16], quien es el encargado de transmitir en forma inalámbrica los datos registrados al nodo coordinador de red.

Este módulo de radiofrecuencia cuenta con una antena externa y amplificador de RF incorporado, con una distancia de transmisión máxima de aproximadamente 800 metros a campo abierto y 200 metros en interiores con paredes de materiales de construcción en seco, a una tasa de transmisión de 250 Kbps. El sistema se alimenta con una batería de litio-ion.

Se pueden utilizar en gran número, en topologías de red en estrella y malla (mesh) [17], y su diseño es resistente debido a que en ciertas aplicaciones (por ejemplo, medición en un puente) puede ser expuesto a condiciones ambientales adversas como lluvia, viento, radiación solar, etc.

El nodo coordinador de red RF con módulo GSM/GPRS incorporado está destinado a la coordinación de la red de sensores RF, solicitar la toma de muestras de cada nodo sensor, recibir los datos enviados por estos nodos, procesarlos y transmitirlos a un servidor remoto de Internet mediante el uso de la red de datos GPRS.

Además del módulo RF (nRF24L01) encargado de enviar y recibir datos de los nodos sensores, el nodo coordinador de red también está constituido por un módem GSM/GPRS con la capacidad de conectarse a Internet en forma inalámbrica. El módulo para esta función es el módulo Quectel M95 [18], que cuenta con pila de protocolos TCP/IP, UDP/IP, HTTP y FTP integradas, y que puede configurarse y controlarse mediante comandos AT por interface serie. Este módulo incluye un chip telefónico tipo SIM y una antena externa con conector SMA.

También está previsto incorporar una interface por fibra óptica de plástico [19], ya que es sumamente útil en aplicaciones industriales donde deben colectarse datos en ambientes con riesgo de explosión o expuestos a interferencia electromagnética. Esta interface está compuesta por módulos de Tx/Rx ópticos de bajo costo [20], atendiendo a la premisa general del sistema de minimizar los costos para una adopción masiva.

Como fuente de alimentación para este nodo se cuenta con una batería de alto rendimiento y con una buena relación peso/carga, del tipo Litio-Ion con más de 4000 mAh. Para realizar la carga de la misma se ha incluido un circuito integrado de carga específico, que respeta el perfil de carga exigido para este tipo de baterías.

La carga de la batería puede provenir de una fuente externa o a través del puerto USB incorporado en el módulo.

## **5. Funcionamiento de la Red**

Los nodos sensores se colocan en diversos puntos estratégicos de una construcción civil tal como un edificio, un puente, etc. Cada nodo puede contar, además del suministro de energía de la batería, con alimentación de la red o de un pequeño panel solar en caso de no contar con suministro eléctrico en el lugar de instalación. Cada nodo sensor recibe una señal de sincronismo cada segundo desde el nodo coordinador, que cuenta con un módulo GPS para obtención de fecha y hora precisa.

El sistema puede funcionar de dos formas distintas: una es utilizada para análisis estructural y permite registrar continuamente las señales de vibración en diversos puntos de la edificación durante un lapso de tiempo preestablecido.

La otra forma de funcionamiento permite registrar eventos sísmicos detectados por el algoritmo seleccionado (umbral o relación STA/LTA). Los nodos analizan continuamente las señales provenientes de los acelerómetros hasta que se detecta un evento sísmico, y a partir de ese momento se registran los datos provenientes de todos los sensores en la memoria SD, adicionando los datos de

pre-evento almacenados en el buffer circular implementado en memoria SRAM (tal como se explicó anteriormente).

El nodo que detecte primero el evento sísmico será el encargado de informar esta condición al nodo coordinador, quien retransmitirá esta señal a los demás nodos para que comiencen a registrar también el evento.

De esta forma se puede determinar cómo reaccionaron las diversas partes de la estructura de la edificación ante el evento sísmico, permitiendo tomar medidas de mejora estructural si la respuesta de la edificación no corresponde con los resultados esperados para el modelo matemático del mismo.

Una vez pasado el evento sísmico se tendrán los datos del mismo archivados en memoria SD, en un archivo de valores separados por coma (CSV) (figura 5).

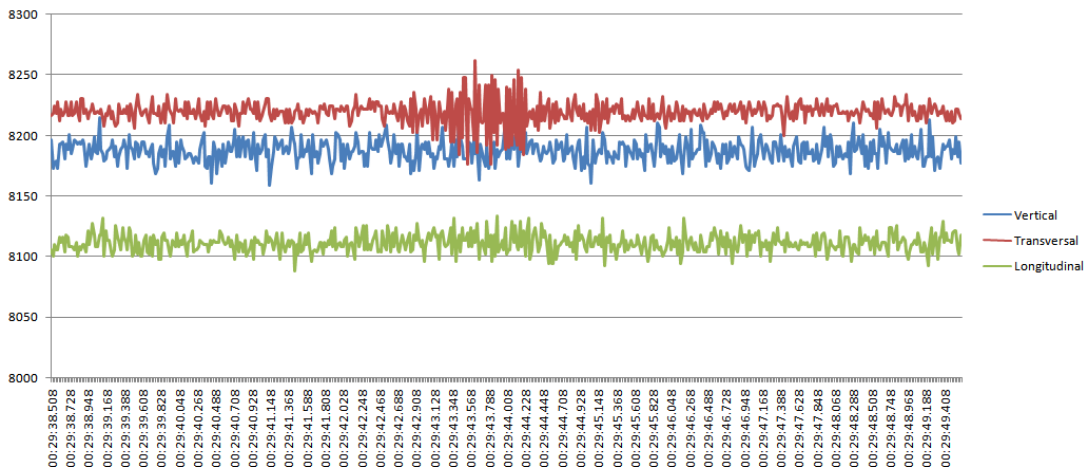


Figura 5 Registro sísmico en formato CSV.

Los parámetros del sistema para cada uno de los nodos se pueden configurar por software desde el nodo coordinador a través de su puerto USB y una interface gráfica (figura 6), o desde internet vía página web. Los parámetros que pueden configurarse son: tasa de muestreo, algoritmo de detección de sismo, tiempo de pre-evento, tiempo de post-evento, modo de funcionamiento (continuo o por evento), enumeración de nodos activos, etc.

El módulo GSM/GPRS utilizado cuenta con pilas de software para su uso en redes de paquetes de datos tales como TCP/IP y UDP/IP. Para la red de sensores descrita en este trabajo se ha utilizado el protocolo UDP/IP para la recepción en tiempo real de datos provenientes de los sensores de aceleración.

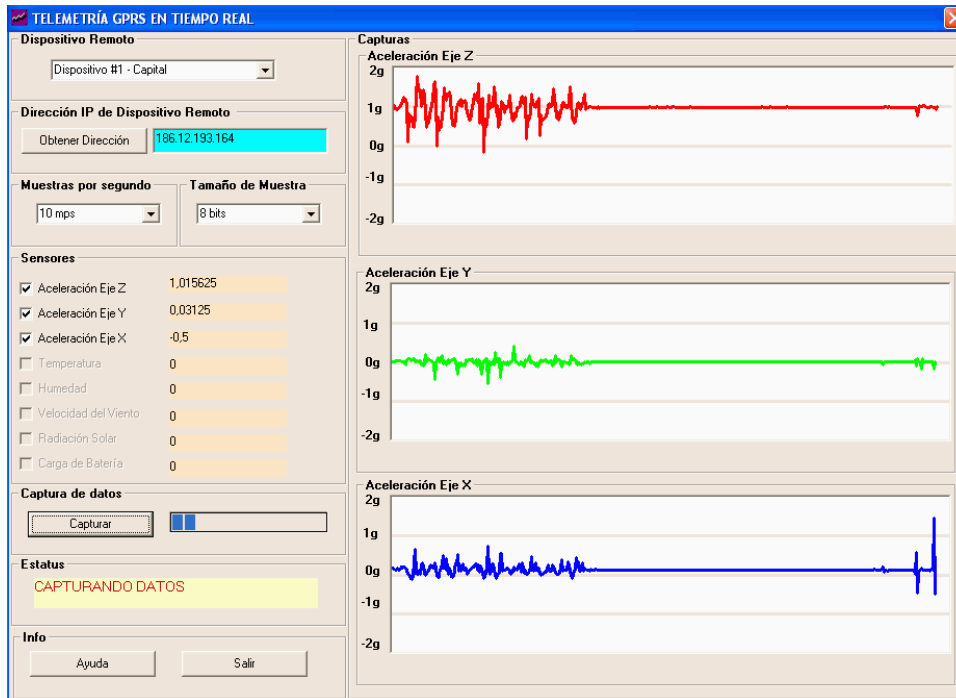


Figura 6 Interface gráfica con recepción de datos en tiempo real.

## 6. Procesamiento de los datos en Servidor Remoto

Los datos de monitoreo sísmico provenientes de la red de sensores inalámbricos se envían vía GSM/GPRS a un servidor remoto en la forma de archivos de datos con extensión CSV (Comma Separated Values o Valores Separados por Comas). Una vez almacenados en el servidor se procede automáticamente a cargar estos datos en tablas de una base de datos MySQL. Para visualizar o analizar los datos cargados en la base de datos se utilizan scripts programados en lenguaje PHP que se encargan de generar páginas web dinámicas con tablas, resultados de procesamiento sobre los datos y las gráficas correspondientes (figura 7).

## 7. Conclusiones

Si bien el Proyecto de Investigación se encuentra en desarrollo, con el prototipo construido se han realizado pruebas de funcionamiento en el edificio del Instituto de Investigaciones Antisísmicas obteniendo resultados satisfactorios para los objetivos propuestos.

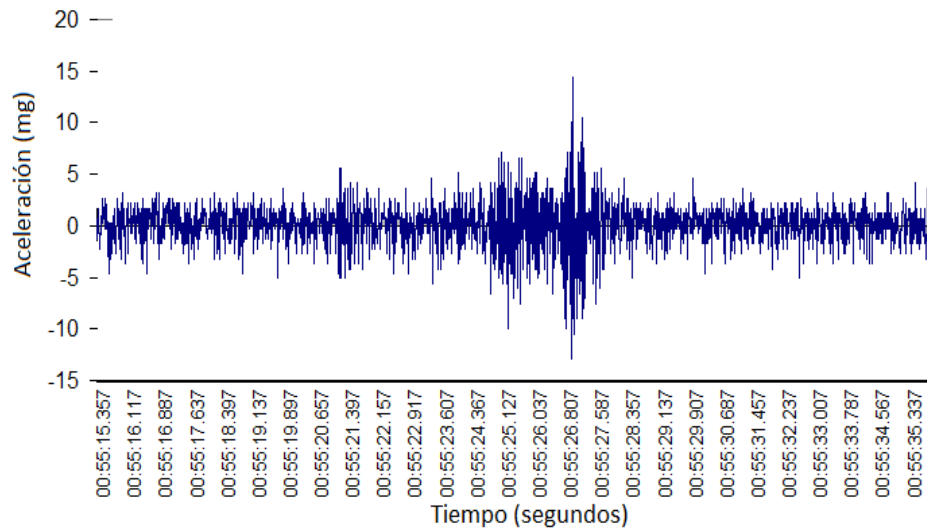


Figura 7 Gráfica dinámica en servidor web.

En la aplicación como acelerómetro independiente para monitoreo de la actividad sísmica se ha logrado registrar, entre otros sismos, varias réplicas del terremoto ocurrido el 16/09/2015 en la región de Los Vilos, Chile, con epicentro aproximadamente a 300 km de la ciudad de San Juan (figura 8, 9 y 10).

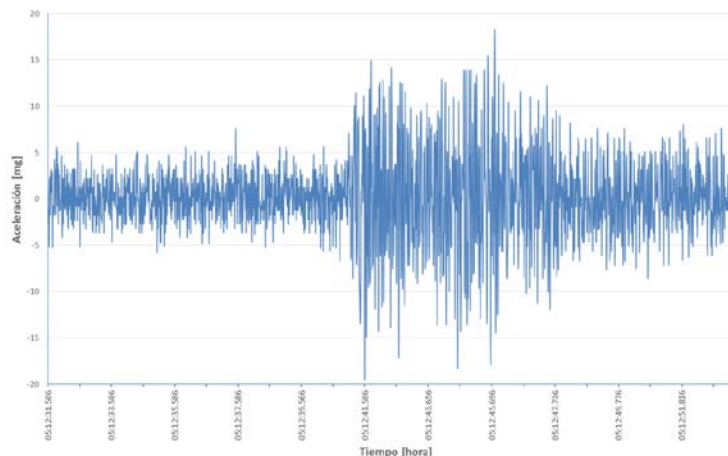


Figura 8 Registro 17/09/2015 – Componente Vertical.

Para las pruebas de funcionamiento en red, tres nodos sensores fueron dispuestos en topología estrella en una planta del edificio, fijados firmemente a la estructura mediante anclaje con tornillos. El objetivo del sistema fue recibir información relativa a las vibraciones a las que estaba sometido el edificio en cada uno de los puntos monitoreados, en forma inalámbrica.



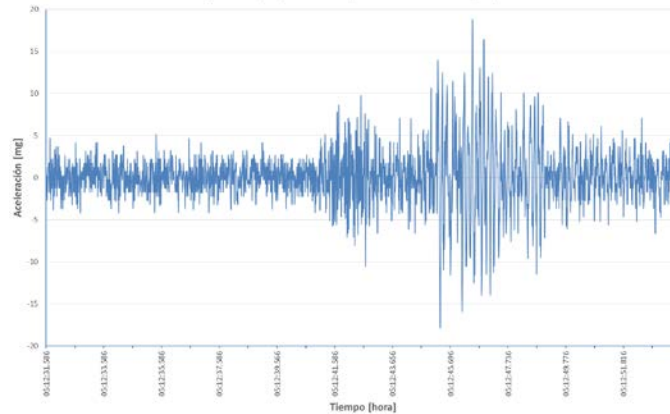


Figura 9 Registro 17/09/2015 – Componente Transversal (N-S).

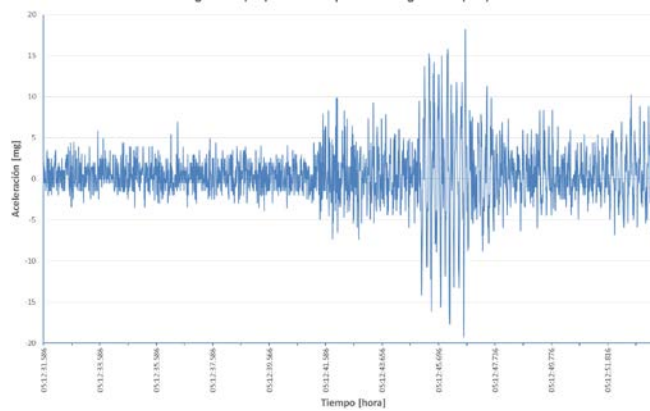


Figura 10 Registro 17/09/2015 – Componente Longitudinal (E-O).

## 8. Bibliografía y Referencias

- [1] Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES). [www.inpres.gov.ar](http://www.inpres.gov.ar).
- [2] Servicio Sismológico Nacional, UNAM. [www.ssn.unam.mx](http://www.ssn.unam.mx).
- [3] Centro Sismológico Nacional, Univ. de Chile. [www.sismologia.cl](http://www.sismologia.cl).
- [4] Earthquake Monitoring of Structures, USGS. <http://earthquake.usgs.gov/monitoring/buildings>.
- [5] E. Safak, K. Hudnut, "Real-time structural monitoring and damage detection by acceleration and gps sensors". 8th US National Conference on Earthquake Engineering San Francisco, California. 2006. Pág. 10.
- [6] R. Boroschek, C. Poblete, "Sistema automático de monitoreo de eventos y movimiento fuerte". XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015. Paper N° 176. 2015. Pág. 12.

- [7] L. M. Rodriguez Peralta, E. I. Hernandez. "Sistema de monitoreo estructural de bajo costo basado en redes de sensores inalámbricos". XI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. 2014. Pág. 16.
- [8] SuraiyaTarannum, "Wireless Sensor Networks", Ed. Croacia: InTech, 2011.
- [9] J. F. Lawrence, E. S. Cochran. "Rapid earthquake characterization using MEMS accelerometers". Bulletin of Seismological Society of América, Vol 104, N° 1, 2014, pág.184-192
- [10] KXR94-2283 -  $\pm$  2g Tri-axis Accelerometer Specifications. Kionix. 2014
- [11] René Rail-Ip, Evaluation of Low-Cost MEMS Accelerometers and Investigation of Inertial Algorithms for Dead Reckoning in Railway Environment. 2014. University of Toronto, Toronto, Canadá.
- [12] J. R. Evans, R. M. Allen, "Performance of several low-cost accelerometers". Seismological Research Letters. Vol 85. N° 1. 2014. Pp. 147-158.
- [13] ADS1247 - 24-Bit Analog-to-Digital Converters. Texas Instruments. USA.
- [14] MCF51JM128 ColdFire Integrated Microcontroller Reference Manual. Freescale Semiconductor. Texas, USA. 2009.
- [15] A. Trnkoczy, Understanding and parameter setting of STA/LTA trigger algorithm. - In: Bormann, P. (Ed.), New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2), Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ. 2012.
- [16] nRF24L01 Single Chip 2.4GHz Transceiver Preliminary Product Specification. Nordic Semiconductor ASA. Noruega. 2008.
- [17] N. Funabiki, Wireless Mesh Networks. 2011. Ed. InTech. Croacia.
- [18] M95 Hardware Design. Quectel Wireless Solutions Co.,Ltd. Shanghai, China. 2012.
- [19] A. Weiner, Plastic Fiber Optics. Siemens. 2003.
- [20] HFBR-0500Z Series Datasheet. AVAGO Technologies. California, USA. 2011.

## **9. Autores**

Ing. Jorge Rodolfo Santalucía – Ingeniero Electricista Electrónico, Universidad Nacional de Córdoba, 1980 – Especialista en Docencia Universitaria, Universidad Nacional de San Juan, 2001.

Ing. Leonardo Gastón Montero Flores, Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional de San Juan, 2014.

# **SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MEDIDA REMOTA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS DE AGUA USANDO UN SENSOR PIEZOELÉCTRICO**

***José Ignacio Vega Luna***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vji@correo.azc.uam.mx*

***Mario Alberto Lagos Acosta***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Gerardo Salgado Guzmán***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Víctor Noé Tapia Vargas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Francisco Javier Sánchez Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

## **Resumen**

El objetivo de este trabajo fue implantar una red de dispositivos para monitoreo remoto de presión en tuberías de agua en un centro de datos. El monitoreo se realiza desde una estación central y la red consiste de dos tipos de módulos: cinco módulos de medida y un módulo coordinador. Los módulos de medida se ubican en el lugar donde están instalados los medidores de presión. El módulo coordinador se encuentra conectado a una computadora personal ubicada en la estación central. En la computadora se ejecuta una interface de usuario que solicita periódicamente, a través del módulo coordinador, el valor de presión a cada módulo de medida y muestra en pantalla el valor de presión medido por los sensores y lo almacena en un archivo. Se usaron transceptores Bluetooth para la comunicación inalámbrica entre el módulo coordinador y los módulos de medida.

Bluetooth se usa comúnmente para comunicar computadoras y periféricos, por lo que la contribución del sistema es el uso de transceptores Bluetooth con alcance de 100 metros para la comunicación entre módulos del sistema y monitoreo de presión, lo cual puede aplicarse para el control de cualquier variable o proceso sin instalar cableado adicional ni modificar el existente.

**Palabra(s) Clave(s):** Bluetooth, centro de datos, comunicación inalámbrica, presión, transceptor.

## 1. Introducción

Hoy en día existen muchos ambientes donde es necesario medir periódicamente la presión de un gas o un líquido, algunos de estos ambientes son: instalaciones industriales, laboratorios, hospitales y centros de datos. Se mide la presión para control o monitoreo de procesos, por protección (seguridad), control de calidad o para transacciones comerciales de fluidos (transferencias de custodia, medición fiscal, estudio e investigación, balances de masa y energía). En el caso particular de centros de datos, los mecanismos de seguridad usados y medidas preventivas de accidentes y siniestros son auditados al menos dos veces por año para certificar la operación segura sin interrupciones. En los centros de datos existen tuberías donde circulan gases inertes para combatir el fuego en equipo de cómputo y comunicaciones en caso de incendio. Si el fuego va más allá del equipo de cómputo se usa agua ultra-pura que circula por un sistema de tuberías. La presión del agua es monitoreada permanentemente para cumplir con los estándares de certificación [1]. Actualmente la mayoría de sistemas de monitoreo de presión de agua y otras variables ambientales en centros de datos, usan comunicación alámbrica entre los sensores y la estación de monitoreo [2]. Otros sistemas usan comunicación inalámbrica. Los de comunicación alámbrica configuran una red CAN (Controller Area Network) de sensores [3] y controladores o usan un segmento de red de datos LAN [4]. Los que usan comunicación inalámbrica utilizan transceptores de radio frecuencia de corto alcance (no mayor a 40 metros) o tecnología GPRS (General Packet Radio Service) [5]. Hoy en día, cuando es necesario implantar un sistema de monitoreo

en la mayoría de centros de datos, no está permitido instalar cableado adicional o modificar el ya existente porque pone en riesgo su operación y certificación. Tampoco es una opción usar transceptores de radio de corto alcance porque los sensores se ubican a distancia entre 60 y 100 metros. Usar tecnología GPRS tiene la desventaja de que es necesario implantar una red celular cuyo costo es relativamente alto y los dispositivos de mayor tamaño [6].

En el sistema aquí desarrollado se monitorea la presión en diferentes puntos de la red de agua de un centro de datos. El valor de presión entregado por los sensores se transmite a la estación de monitoreo usando transceptores inalámbricos Bluetooth cuyo alcance es 100 metros. Los sensores de presión ya se encontraban instalados en la tubería de agua y la medida se realizaba manualmente. Esto presentaba ciertas desventajas, siendo las principales la falta de precisión, tanto en los valores de presión medida como en la fecha y hora reportada, y la disponibilidad de personal para realizar la medida. Los sensores instalados son modelo PBT-RB010SG1SSNAMA0Z. Estos sensores son de tipo piezoeléctrico. Los sensores piezoeléctricos son los más utilizados para medir presión por su precisión y confiabilidad. Estos sensores utilizan el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando el valor medido en señales eléctricas [7]. El efecto piezoeléctrico consiste en la generación de polarización eléctrica al deformarse un material bajo la acción de un esfuerzo. Es un efecto reversible, de modo que al aplicar una diferencia de potencial eléctrico entre dos caras de un material piezoeléctrico, se genera una deformación. La piezoelectricidad es la propiedad que tienen algunas sustancias no conductoras, cristalinas (no tienen centro de simetría), al presentar cargas eléctricas de signo opuesto, en caras opuestas, al ser sometidas a deformaciones mecánicas [8]. El sensor PBT-RB010SG1SSNAMA0Z está construido en base a una membrana circular piezoeléctrica protegida por una capsula de acero inoxidable para emplearse inclusive en ambientes corrosivos. Entrega el valor de presión medido a través de una señal de 4-20 mA y dos cables.

Los sensores empleados en la mayoría de sistemas de control de procesos están distribuidos geográficamente, por lo que la información que proporcionan en su salida viaja grandes distancias. La transmisión de datos sobre distancias considerables comúnmente causa grandes problemas en sistemas de procesos distribuidos. Para que la información se transmita de manera confiable se usan diferentes esquemas de comunicación y productos asociados. Una técnica usada en la señal de salida de sensores en el ámbito industrial, es el lazo de corriente de 4-20 mA.

Una gran variedad de sensores y dispositivos de medición usan el lazo de corriente de 4-20 mA para enviar el valor que miden sobre grandes distancias (más de 300 metros). En esta técnica, 4 mA representan el nivel de salida cero del sensor y 20 mA representan la salida a máxima escala del sensor [9]. Colocando un receptor en un extremo remoto se convierte la corriente a voltaje para ser procesado por un dispositivo digital. La transmisión de la información se realiza en forma de corriente debido a que si se realiza por voltaje se produciría disminución en su nivel debido al alambrado y resistencias conectadas en el circuito, a menos que los dispositivos que actúan como cargas tengan impedancias de entrada muy grandes. A pesar de esto, los dispositivos de alta impedancia pueden ser muy sensibles a ruido generado por interferencia sobre los cables de interconexión. En el sistema desarrollado, la señal de 4-20 mA se usó para determinar el valor de presión por medio de un microcontrolador. El valor de presión se transmite inalámbricamente a la estación central de monitoreo usando tecnología Bluetooth.

La tecnología Bluetooth usa la banda ISM de frecuencia de 2.4 GHz. para transmitir voz y datos. Originalmente Bluetooth fue diseñada para facilitar la comunicación entre equipos móviles y fijos, eliminando cables y conectores entre los equipos a comunicar, pero se puede usar para implantar una red de transceptores Bluetooth compactos y de bajo costo para el monitoreo de variables [10]. Cada dispositivo Bluetooth tiene una dirección única de 48 bits (PIN o dirección Bluetooth) basada en el estándar IEEE 802.15, simplificando su configuración y detección para formar pares en redes de este tipo de circuitos. La

comunicación entre dos dispositivos Bluetooth es bajo el esquema maestro-esclavo y punto a punto. En una red con transceptores Bluetooth existe un maestro y hasta siete esclavos. La comunicación se realiza por radiofrecuencia de forma que los dispositivos no tienen que estar alineados. En la tabla 1 se indican las tres clases de dispositivos Bluetooth existentes de acuerdo a la potencia de transmisión y todos son compatibles entre sí [11].

Tabla 1 Clasificación de dispositivos Bluetooth según su potencia.

Clase	Potencia máxima (mW)	Potencia máxima (dBm)	Alcance (m)
Clase 1	100	20	100
Clase 2	2.5	4	10
Clase 3	1	0	1

Los dispositivos con Bluetooth también se clasifican según su ancho de banda en 4 versiones como se indica en la tabla 2.

Tabla 2 Clasificación de dispositivos Bluetooth según ancho de banda.

Versión	Ancho de banda (Mbps)
Versión 1	1
Versión 2	3
Versiones 2.1 y 3	24
Versión 4	24

Los transceptores Bluetooth usados en este trabajo son los circuitos RN41 Clase 1, Versión 2.1.

## 2. Desarrollo

La metodología usada consistió en dividir el diseño del sistema en dos partes. La primera parte fue la realización de los módulos de medida y la segunda parte fue la construcción del módulo coordinador. Se construyeron cinco módulos de medida ubicados en lugares de la tubería de agua donde está instalado un sensor de presión. El módulo coordinador se encuentra en una estación central de monitoreo. Para comunicar los módulos de medida con el módulo coordinador se utilizó una red de transceptores Bluetooth. Los dos tipos de módulos



incorporan un transceptor Bluetooth. El transceptor del módulo coordinador se configuró como maestro y el transceptor de los módulos de medida como esclavo. Periódicamente el maestro solicita a los esclavos determinar el valor de presión en base a la salida del sensor y al recibirla la envía a una interface de usuario ubicada en una computadora personal en la estación central. A continuación se explica el diseño de los módulos que componen al sistema y en la figura 1 se muestra el diagrama de bloques del sistema.

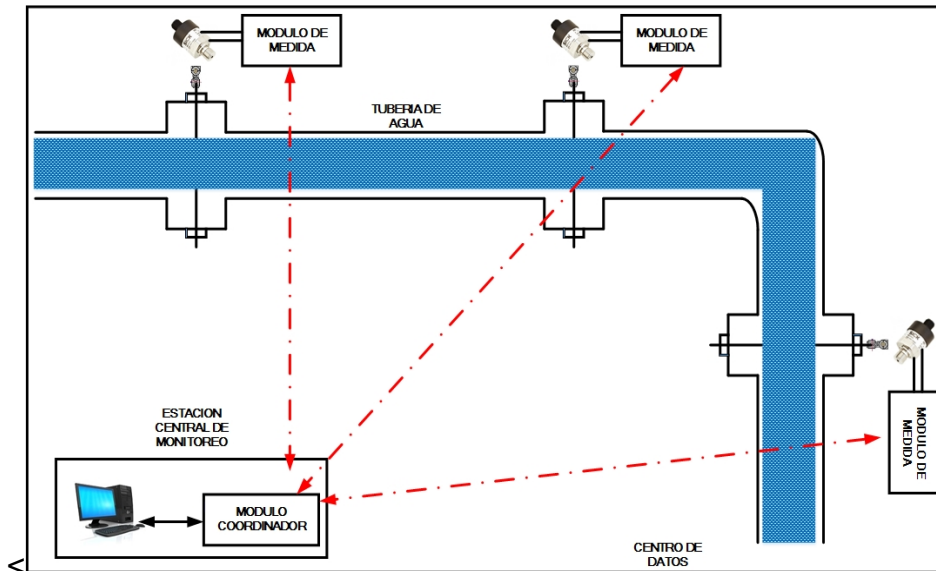


Figura 1 Diagrama de bloques del sistema.

### Los módulos de medida

Los cinco módulos de medida tienen la misma arquitectura. Cada módulo está compuesto por cuatro unidades funcionales: el sensor de presión, la etapa adaptadora de señal, el microcontrolador y el transceptor inalámbrico, como se indica el diagrama de bloques de la figura 2.

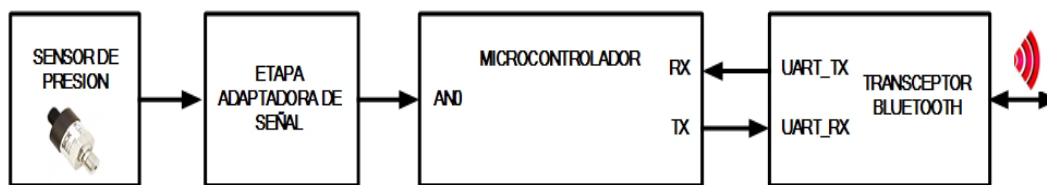


Figura 2 Diagrama de bloques del módulo de medida.

## Sensor de presión

Se utilizó el sensor PBT-RB010SG1SSNAMA0Z ya instalado en la tubería de agua. El rango de medida de presión de este dispositivo es 0 a 10 bar, trabaja a una temperatura de 0 a 80 °C y tiene una precisión de 1%. El sensor entrega el valor de presión medido a través de lazo de corriente de 4-20 mA usando dos terminales. Esta señal de corriente se conecta a la entrada de la etapa adaptadora para convertirlo a un valor de voltaje antes de ser leído por el microcontrolador.

## Etapa adaptadora de señal

Esta etapa fue necesaria ya que la señal de entrada del convertidor analógico/digital (ADC) del microcontrolador debe estar en el rango de 0 a 5 V y el sensor entrega una señal que varía en corriente. En la figura 3 se indica el circuito electrónico de la etapa adaptadora de señal, se puede observar que en la entrada de esta etapa se encuentra una resistencia que genera una caída de voltaje cuyo valor máximo se obtiene a partir del valor máximo de corriente (20 mA) de la señal de entrada (salida del sensor).

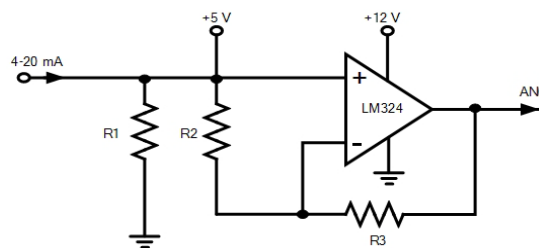


Figura 3 Circuito de la etapa adaptadora de señal.

Para calcular el valor de la resistencia se usó la siguiente relación:

$$R = V_{MAX}/I_{MAX} = 5 \text{ V} / 20 \text{ mA} = 250 \Omega$$

Utilizando una resistencia de este valor se genera un voltaje proporcional a la corriente, sin embargo el valor de voltaje que se obtiene con el valor mínimo de corriente tendrá el siguiente valor:

$$V_{\text{MIN}} = R * I_{\text{MIN}} = 250 \Omega * 4 \text{ mA} = 1 \text{ V}$$

Si se usa una resistencia de 250  $\Omega$  el rango de voltaje a la entrada del ADC estará en el rango de 1 a 5 V, perdiendo 20% de resolución. Por tal razón, la caída de voltaje en la resistencia se conectó a la entrada positiva de un amplificador operacional (OPAM) para ajustar su valor y no tener pérdida de voltaje al no circular corriente a través del OPAM. En la entrada negativa del OPAM se conectó un divisor de voltaje para que la señal varíe dentro del rango necesario de voltaje usando un voltaje de referencia de +5 V. De esta forma, se obtuvo correspondencia lineal entre la señal de 4-20 mA y el voltaje de 0-5 V suministrado al ADC.

### **Microcontrolador**

El microcontrolador usado fue un PIC18F2455. Se utilizó este dispositivo porque tiene al menos los recursos necesarios para leer la salida de voltaje de la etapa acondicionadora, convertirla a un valor digital y transmitirla en forma serie al transceptor inalámbrico. El PIC integra los siguientes recursos: CPU de 8 bits, 24 kB de memoria de programa, 2,048 Bytes de memoria RAM, 256 Bytes de memoria EEPROM, convertidor analógico-digital de 10 bits, 10 canales y un puerto EUSART. La salida del OPAM de la etapa acondicionadora se conectó a la entrada AN0 del ADC del microcontrolador, la salida TX del USART del PIC se conectó a la terminal UART\_RX del transceptor inalámbrico y la entrada RX del EUSART del PIC se conectó a la terminal UART\_TX del transceptor inalámbrico Bluetooth.

El programa que se ejecuta en el microcontrolador se diseñó en base al diagrama de flujo indicado en la figura 4, se implantó en lenguaje mikroC FOR PIC y realiza las tareas que se explican a continuación. Configura el ADC indicando que use como fuente de referencia analógica la señal de voltaje de la terminal  $V_{\text{DD}}$ . Configura el Puerto EUSART en modo asíncrono e indica a los registros del generador de baud rate la velocidad de 921 kbps. A continuación espera en el Puerto EUSART la llegada de la petición de lectura de presión enviada por el

módulo coordinador. Una vez que llega la petición, solicita al ADC muestrear la entrada AN0. Posteriormente lee los registros de datos del ADC para obtener la palabra digital de 10 bits correspondiente al valor de presión. Finalmente transmite al Puerto EUSART la palabra digital para que sea enviada por el transceptor RN41.

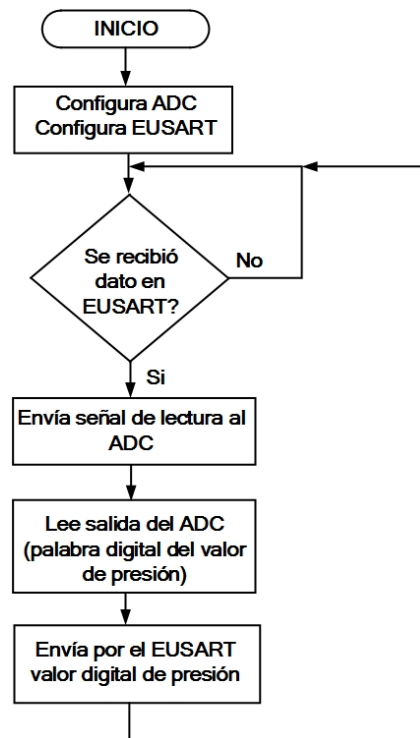


Figura 4 Diagrama de flujo del programa del módulo de medida.

### Transceptor Bluetooth

Debido a que un requisito básico en el diseño de este sistema fue que la distancia máxima entre el módulo coordinador y los módulos de medida sea 100 metros, se utilizó el circuito RN41. El RN41 es un transceptor Bluetooth Clase 1 Versión 2.1 de tamaño compacto con antena integrada que transmite información inalámbricamente a una velocidad máxima de 240 kbps y alcance de 100 metros. Se alimenta con 3.3 V y consume menos de 10 mA, trabaja en el rango de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$ - $85^{\circ}\text{C}$  y humedad relativa menor a 90%. El RN41 tiene asignada una dirección Bluetooth única de 48 bits, se comunica inalámbricamente con el módulo coordinador por radio frecuencia y con el

microcontrolador por medio del puerto EUSART a una velocidad de 921 kbps. El circuito RN41 de este módulo se configuró desde la computadora personal usando un programa emulador de terminal enviándole comandos AT. La configuración incluyó inicializarlo en Modo Esclavo, velocidad de transferencia serie 921 kbps, longitud del dato 8 bits, sin paridad y un bit de parada. En esta configuración también se le asignó el nombre y código de enlace o PIN, lo cual es usado cuando se aparea con otro dispositivo Bluetooth maestro antes de transmitir información.

### El módulo coordinador

La arquitectura de este módulo, indicada en el diagrama de bloques de la figura 5, es similar a la de los módulos de medida, ya que la tarea de ambos tipos de módulos es complementaria para el funcionamiento del sistema.

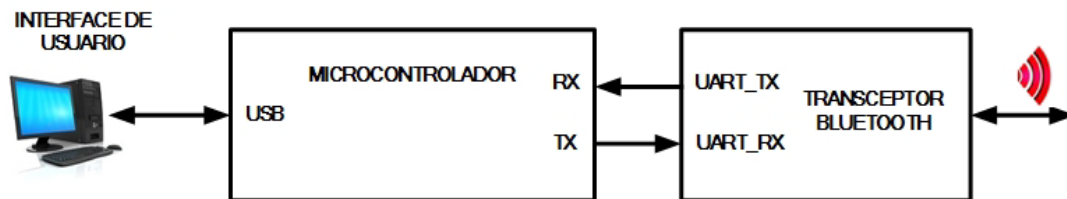


Figura 5 Diagrama de bloques del módulo coordinador.

El módulo coordinador está compuesto por un transceptor inalámbrico Bluetooth y un microcontrolador. El transceptor inalámbrico es el circuito RN41 configurado en Modo Maestro, el cual se encarga de enviar por radio frecuencia las solicitudes de lectura de presión a los módulos de medida, recibir la respuesta y transmitirla al puerto EUSART del microcontrolador. El microcontrolador usado fue un PIC18F2455 principalmente porque cuenta con un puerto EUSART para comunicarlo con el circuito RN41 y un puerto USB V2.0. El puerto USB puede usar un regulador interno de 3.3 V para generar los niveles de voltaje de sus líneas de salida y comunicarlo con la computadora. Este puerto puede configurarse en uno de dos modos: low speed (1.5 Mbps) o full speed (12 Mbps). El programa que se ejecuta en el microcontrolador del módulo coordinador se diseñó en base al diagrama de flujo indicado en la figura 6.

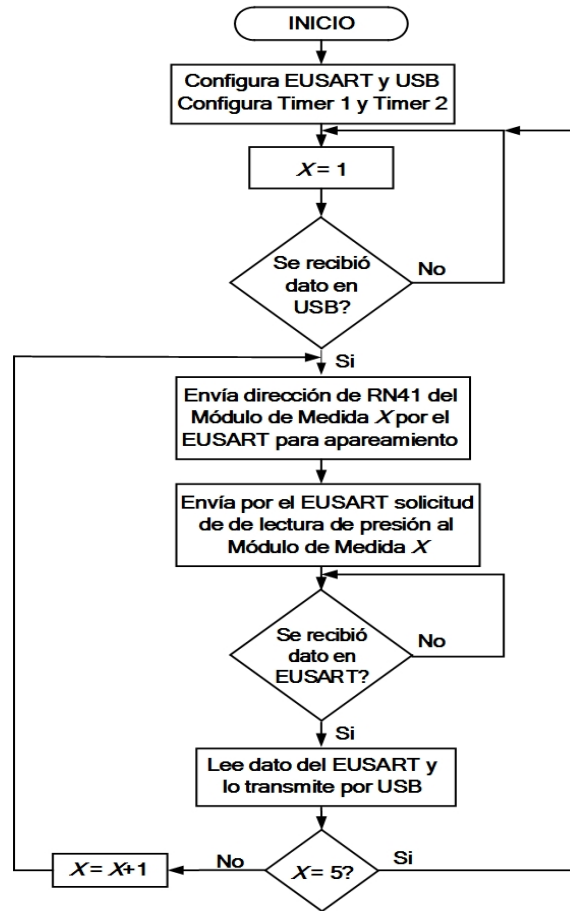


Figura 6 Diagrama de flujo del programa del módulo coordinador.

El programa se implantó en lenguaje mikroC FOR PIC y realiza las tareas que se explican a continuación. Configura el Puerto EUSART en modo asíncrono e indica a los registros del generador de baud rate la velocidad de 921 kbps. Configura el Puerto USB e indica en los registros del Puerto que active el regulador interno de 3.3 V y modo full speed. A continuación espera en el Puerto USB la llegada de la petición de lectura de presión enviada por la interface de usuario. Una vez que llega la petición, envía el comando de apareamiento al transceptor RN41 de cada módulo de medida y finalmente, solicita la lectura de presión a cada sensor.


La interface de usuario se ejecuta en la computadora y se programó en lenguaje Visual Basic. La interface realiza las siguientes tareas: configura el Puerto USB, solicita periódicamente, cada 60 segundos, al microcontrolador del módulo coordinador enviar la petición de lectura de presión a cada módulo de medida

(este periodo de tiempo es configurable) muestra en pantalla el valor actual de los valores de presión de los sensores (figura 7) y almacena en un archivo el histórico los valores de presión de cada sensor como se puede ver en la figura 8.



VALOR PRESIÓN (BAR)	HORA-FECHA
3.05	04/03/2016 15:42
3.05	04/03/2016 15:43
3.05	04/03/2016 15:44
3.05	04/03/2016 15:45
3.06	04/03/2016 15:46
3.05	04/03/2016 15:47
3.05	04/03/2016 15:48
3.07	04/03/2016 15:49
3.07	04/03/2016 15:50
3.04	04/03/2016 15:51
3.04	04/03/2016 15:52
3.04	04/03/2016 15:53
3.04	04/03/2016 15:54
3.04	04/03/2016 15:55
3.04	04/03/2016 15:56
3.04	04/03/2016 15:57
3.04	04/03/2016 15:58

Figura 7 Menú principal de la interface de usuario.



SENSOR 1	SENSOR 2
1.75 bar	1.9 bar
SENSOR 3	SENSOR 4
2.03 bar	2.35 bar
SENSOR 5	SENSOR 6
3.09 bar	
SENSOR 7	SENSOR 8

Figura 8 Valores históricos de presión mostrados en la interface de usuario.

### 3. Resultados

En la implantación de este trabajo se realizaron cinco módulos de medida, todos con la misma arquitectura. Se llevó a cabo un conjunto de pruebas de funcionalidad del sistema que tuvieron tres objetivos principales:

- Determinar la tasa de transferencia máxima que se puede lograr entre los módulos de medida y el módulo coordinador.

- Determinar el alcance entre ambos tipos de módulos.
- Comparar el valor de la precisión medida por este sistema con respecto a las medidas manuales que se realizaban.

El primer conjunto de pruebas realizadas podría pasar inadvertido en aplicaciones de monitoreo remoto de variables ya que no se transmiten bloques de tamaño grande entre los módulos de medida y el módulo coordinador, sin embargo se llevó a cabo y se obtuvieron resultados interesantes. Para realizar estas pruebas se transmitió 10 veces un bloque de datos de 10 kB (100 kB) desde un módulo de medida. Se transmitió 10 veces el bloque porque el microcontrolador de la unidad de medida solo tiene 24 kB de memoria de programa. El transceptor RN41 se puede comunicar con el USART del microcontrolador a velocidades de 1.2 a 921 kbps y transmitir información por RF a 240 kbps. Inicialmente se configuró el USART a 1.2 kbps, la transmisión del bloque de 100 kB se realizó en 14 segundos, posteriormente se incrementó la velocidad gradualmente hasta llegar a la máxima de 921 kbps y el tiempo de transmisión disminuyó a 3 segundos como se indica en la gráfica de la figura 9.

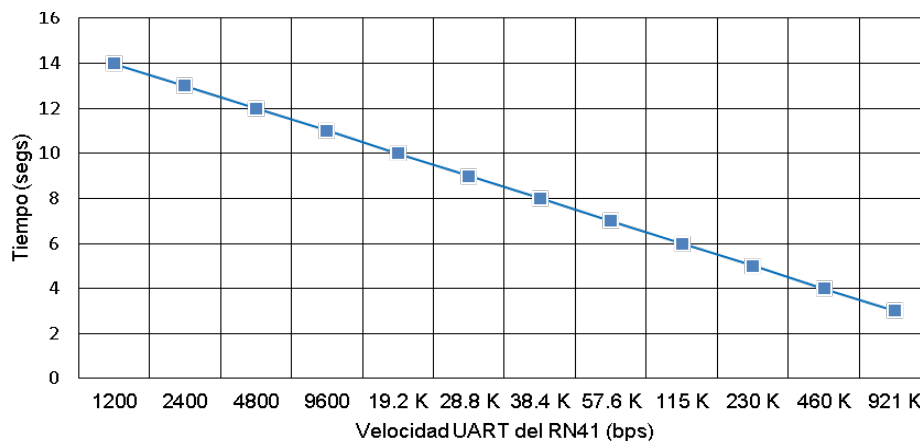


Figura 9 Tasa de transferencia entre los módulos de medida y el módulo coordinador.

Configurando el USART a 921 kbps la transmisión del bloque de 100 kB (un poco más de 800 kbits) debería tardar 1 segundo. Tardó 3 segundos porque la velocidad de la salida RF (240 kbps) del transceptor Bluetooth es menor a la velocidad de la salida del USART (921 kbps).



En el segundo conjunto de pruebas se ubicaron módulos de medida, sin conectar sensores, a diferentes distancias con línea de vista del módulo coordinador y se transmitió un bloque de 64 bytes, ya que los sensores no se pueden mover, están conectados de manera fija en la tubería de agua. Se transmitió un bloque de 64 bytes, y no de 100 kB como en el primer conjunto de pruebas, porque se necesitaba determinar el alcance usando un bloque de tamaño real al enviado en esta aplicación. Configurando el USART del transceptor RN41 con velocidades de 1.2 a 115 kbps, la distancia alcanzada fue 102 metros. Con velocidades de 230, 460 y 921 kbps la distancia alcanzada disminuyó hasta 95 metros como se indica en la gráfica de la figura 10. Ya que la cantidad de información transmitida entre los módulos de medida y el módulo coordinador no son bloques grandes como el de 100 kB usado en la primera gráfica, la velocidad entre el microcontrolador y el circuito RN41 se estableció a 115 kbps en ambos tipos de módulos para lograr la mayor distancia (102 metros) entre ambos. Esta distancia es un poco mayor a los 100 metros especificados por el fabricante del transceptor Bluetooth.

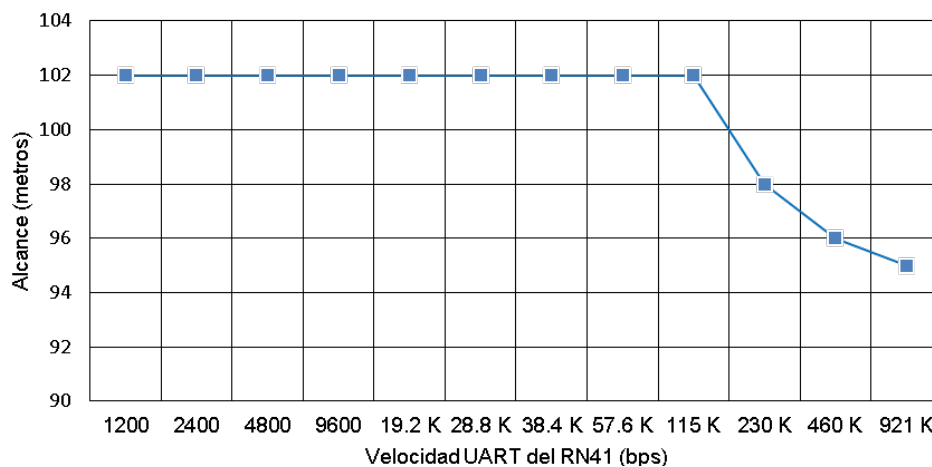


Figura 10 Alcance entre los módulos de medida y el módulo coordinador.

En el tercer grupo de pruebas se solicitó a personal del centro de datos variar la presión del agua de las tuberías. Las pruebas se realizaron en una ventana de mantenimiento, ya que no es común modificar la presión. Se comparó el valor de presión indicado por la interface de usuario con la mostrada en el display LCD del sensor y se tuvo una diferencia de +/- 1%.

## **4. Discusión**

Al transmitir un bloque de datos de 100 kB entre los módulos de medida y el módulo coordinador en 3 segundos, configurando el USART del RN41 a máxima velocidad de 921 kbps, no tiene impacto mayor en esta aplicación de monitoreo por dos razones: 1) la cantidad de información transmitida no supera los 64 bytes, sin embargo, el sistema está preparado para transmitir bloques de datos de 100 kB entre ambos módulos, por ejemplo cuando el módulo coordinador necesite enviar órdenes, comandos o archivos a controladores o actuadores, 2) la interface de usuario monitorea el valor de presión cada 60 segundos, tiempo suficiente para transmitir el archivo en 3 segundos.

En la aplicación desarrollada, el alcance logrado de 102 metros con transceptores Bluetooth es suficiente, ya que el área de los centros de datos sigue creciendo en la actualidad pero siempre se dividen en áreas pequeñas llamada bunkers cuya distancia a la oficina central no es mayor a 100 metros.

Por otra parte, puede verse como desventaja que el sistema construido use tecnología Bluetooth, ya que una red Bluetooth puede estar formada por un dispositivo maestro y hasta siete esclavos. En este sistema se construyeron cinco módulos de medida, puede crecer hasta siete, si es necesario que el sistema tenga más de siete, por ejemplo cuando el centro de datos ha crecido e instalado sensores de presión adicionales, será necesario contar con más de una red Bluetooth incorporando otro transceptor al módulo coordinador, lo cual tiene la ventaja de separar las redes Bluetooth, una para cada bunker, y contar con mayor seguridad y velocidad en la transmisión de información.

## **5. Conclusiones**

Se construyó un sistema sencillo de medida y registro de presión remota, de bajo costo y fácil de instalar y usar que cumple con la función solicitada. Una ventaja del sistema implantado, con respecto a los existentes actualmente en centros de datos e industrias, es el uso de comunicación inalámbrica entre los módulos que lo componen ya que no interfiere ni modifica la infraestructura de cableado y comunicaciones usada en el lugar donde se instale. El haberlo

construido de forma modular fue con el propósito de extender su funcionalidad para adaptarlo a las dimensiones de las instalaciones donde vaya a usarse o bien si se necesita mayor alcance se pueden sustituir los transceptores Bluetooth por otros de tecnología más reciente como por ejemplo transceptores LoRa Wireless para implantar redes de área amplia de baja potencia (Low Power Wide Area Network-LPWAN) o XBee SX, ambos enfocados a aplicaciones metropolitanas con alcance de decenas de kilómetros.

Otra ventaja del sistema implantado con respecto a los comercialmente existentes es el método de muestreo automático, remoto y con periodo configurable que genera un archivo de valores que no solo es accedido por la interface de usuario, si no también puede ser usado por otros procesos y herramientas de auditoría y monitoreo del centro de datos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] J. Qu, L. Li, L. Liu, "Smart temperature monitoring for data center energy efficiency". IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI). Dongguan. 28-30 July 2013. Pp.: 360-365.
- [2] M. R. C. Trusca, S. Albert, M. L. Soran, "The benefits of data center temperature monitoring". 2015 Conference Grid, Cloud & High Performance Computing in Science (ROLCG). Cluj-Napoca. 28-30 Oct. Pages: 1-3. 2015.
- [3] W. Sun, X. Chen, F. Liu, "Collection System for Pressure Information of Buildings Based on the IoT and CAN Bus". International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). Sanya. 10-12 Oct. 2012. Pp. 274-277.
- [4] A. Roohi, K. Raeisifard, S. Ibrahim, "An application for management and monitoring the data centers based on SNMP". IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD). Batu Ferringhi. 16-17 Dec. 2014. Pp. 1-4.
- [5] A. M. Telgote, V. Narayanan, N. A. Dave, "Design and implementation of water environment monitoring system using GSM technology". International

- Conference on Technologies for Sustainable Development (ICTSD). Mumbai, 4-6 Feb. 2015. Pp. 1-4.
- [6] Q. Wu, Y. Liang, Y. Sun, C. Zhang, "Application of GPRS technology in water quality monitoring system". World Automation Congress (WAC). Kobe. 19-23 Sept. 2010. Pp. 7-11.
- [7] J. Kim, H. Lee, S. Cha, B. Choi, "Fabrication and evaluation of implantable pressure sensor using strain gauge". Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON). Ubon Ratchathani. 5-7 Dec. 2012. Pp. 1-4.
- [8] L. G. Occhipinti, E. Fontana, S. Smerzi, E. Spoto, "Flexible and conformable strain gauges for smart pressure sensors systems: Static and dynamic characterization". IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). Rome. 27-30 July. 2015. Pp. 1303-1307.
- [9] C. Pornpatkul, W. Suksathid, "Pressure control design by Fieldbus system for the pressure gauge calibration". 13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Gwangju. 20-23 Oct. 2013. Pp. 1565-1570.
- [10] M. A. Dayioğlu, "Development of real-time wireless monitoring system for greenhouses: Industrial Bluetooth application". 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Trabzon. 23-25 April. 2014. Pp. 548-551.
- [11] R. Nagarajan, R. Dhanasekaran, "Implementation of wireless data transmission in monitoring and control". International Conference on Communications and Signal Processing (ICCSP). Melmaruvathur. 3-5 April. 2013. Pp. 83-87.

## **7. Autores**

M.C. José Ignacio Vega Luna obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones de microcontroladores, UNIX y sistemas de alta disponibilidad. Desde 1985 es Profesor Titular de carrera en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Mario Alberto Lagos Acosta es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Asociado en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Gerardo Salgado es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Víctor Noé Tapia Vargas es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco, cuenta con el 100% de créditos de la Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores, microcontroladores y robótica. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

# DISEÑO DEL TABLERO AUTOMOTRIZ REMOTO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EXPERIMENTAL VE-LINCE 1

***Luis Antonio Ramírez Arredondo***

Instituto Tecnológico de Celaya

*12030565@itcelaya.edu.mx*

***Francisco Javier Pérez Pinal***

Instituto Tecnológico de Celaya

*francisco.perez@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Este documento es el reporte de diseño del tablero automotriz remoto basado en LabVIEW, para el vehículo eléctrico experimental (VE-Lince 1). El tablero diseñado permite visualizar parámetros del vehículo eléctrico, los cuales son sensados por una tarjeta electrónica basada en el DSPIC30F4013 y enviados vía bluetooth hacía el tablero. Los parámetros a mostrar son: velocidad, carga de las baterías y sentido de avance del vehículo. Así mismo, los datos se muestran al usuario a través de una Tablet; y se lleva un registro de los mismos. Se reportan las etapas de la metodología utilizada, y se presenta la implementación del tablero en una Tablet Vulcan Challenger II.

**Palabra(s) Clave(s):** Automotriz, Bluetooth, LabVIEW, monitoreo, tablero.

## **1. Introducción**

Los automóviles, gracias al avance tecnológico, cada vez tienen sistemas más sofisticados, permitiendo al conductor tener una experiencia de manejo más cómoda y con mayor seguridad. En más de 100 años de la existencia del automóvil, el aspecto exterior e interior, no es el mismo. Desde sus materiales de construcción, tracción e incluso su tablero [1].

## **1900 – 1930**

Los primeros automóviles que salieron a la luz comercialmente, contaban tan sólo con un tablero de madera u otro material liso, sin ningún tipo de compartimiento o dispositivo. En la primera década de su comercialización, se fueron agregando compartimientos para guardar cosas, además de aparecer los primeros indicadores de velocidad y de nivel de gasolina, (figura 1) [1].



Figura 1 Típico tablero en los primeros vehículos.

## **1940 – 1980**

A principios de los años 40's el concepto de estética empezó a cobrar importancia entre los fabricantes de automóviles. Además, en este periodo el Diodo Emisor de Luz, LED por sus siglas en inglés, empezó a formar parte de algunos modelos de la época. Lo que permitió actualizar muchas de las funciones de visualización de las herramientas, figura 2 [1].



Figura 2 Interior del Buggatti Type 41 Royale de 1930.

## **1990 – 2000**

En este periodo la posibilidad de reproducir, dentro del automóvil, discos compactos (CD) y archivos mp3 se volvió una realidad. Por lo tanto, las pantallas

se acomodaron al interior del automóvil, con funciones que iban desde controlar algunos aspectos del auto hasta reproducir video [1].

## 2000 – Presente

Desde el año 2000 hasta la fecha, el entretenimiento y la comodidad son primordiales. Los reproductores de DVD, pantallas táctiles y videojuegos continúan siendo una característica de los desarrollos actuales. Donde los servicios de guía GPS, llamadas y chat son algunas variantes incluidas en los tableros de los automóviles. Un ejemplo puede ser el automóvil Audi TT, que ha integrado a su tablero, las tecnologías antes mencionadas, figura 3 [1].



Figura 3 Tablero del Audi TT 2016.

## Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es el de desarrollar el tablero automotriz remoto del vehículo eléctrico experimental (VE-Lince 1) del Instituto Tecnológico de Celaya.

El tablero tiene la finalidad de monitorear diversos parámetros tales como el nivel de carga de las baterías, la velocidad y el sentido de avance del vehículo. Asimismo, el sistema permite almacenar los valores monitoreados en un archivo de texto, el cual servirá posteriormente para desarrollar patrones de manejo y consumo. Estos últimos son requeridos para desarrollar las estrategias de manejo de energía del VE-Lince 1, las cuales serán reportadas en artículos futuros.



## 2. Desarrollo

La programación del tablero se divide principalmente en cuatro secciones: la adquisición de datos, la separación de datos, el despliegado de valores y el registro de las mediciones, figura 4. A continuación, se explicará con detalle cómo se elaboró cada etapa en LabVIEW y su funcionamiento.

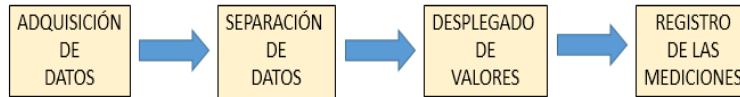


Figura 4 Programación secuencial del tablero propuesto.

### Etapa de adquisición de datos

La etapa de adquisición de datos se compone básicamente de cuatro partes: la configuración del puerto serial, el tiempo de espera entre cada muestreo, la lectura de cadena de entrada y la separación entre tramos de datos entrantes en la cadena, figura 5.

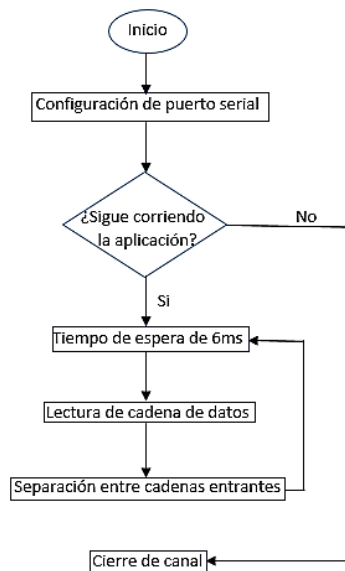


Figura 5 Diagrama de flujo de la etapa de adquisición de datos.

Es necesario mencionar que la comunicación por bluetooth se realiza de manera serial, por lo que, el primer elemento que se encuentra en esta etapa es una

herramienta de NI VISA, llamada VISA Serial, figura 6. La cual, permite establecer la configuración del puerto serial para que se puedan recibir los datos provenientes de un dispositivo bluetooth.

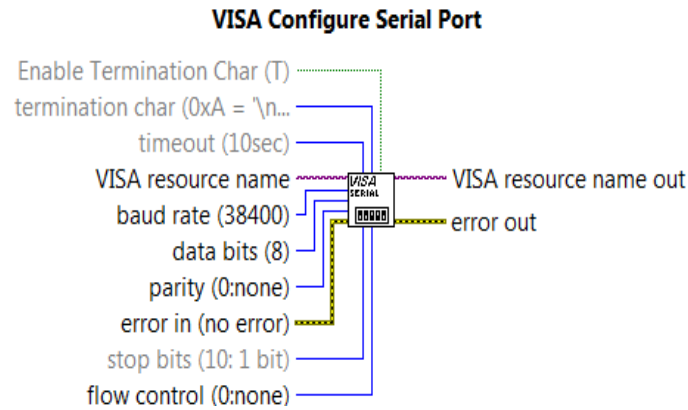


Figura 6 Terminales del bloque VISA Serial.

Una vez que se reciben los datos, el programa entra a un ciclo de retardo llamado Flat Sequence. Flat Sequence permite programar un tiempo de espera en milisegundos antes del siguiente bloque. Para el desarrollo propuesto en este trabajo, el periodo de muestreo de la tarjeta se seleccionó de 6ms figura 7.

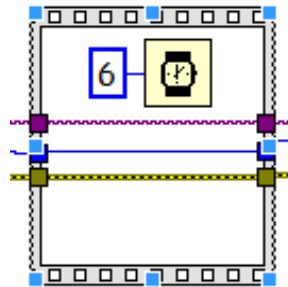


Figura 7 Estructura Flat Sequence con un tiempo de espera de 6ms.

Posteriormente se realizó la lectura de los datos recibidos por medio de la herramienta VISA Read, figura 8.

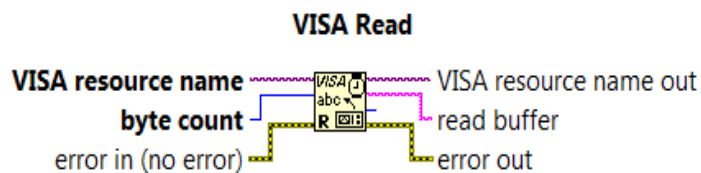


Figura 8 Terminales del bloque VISA Read.

Cabe mencionar, que las terminales Resource name out y Error out del bloque VISA Read deben de conectarse al bloque de cierre de canal VISA Close. Esto último, para evitar errores en la compilación del programa, figura 9.

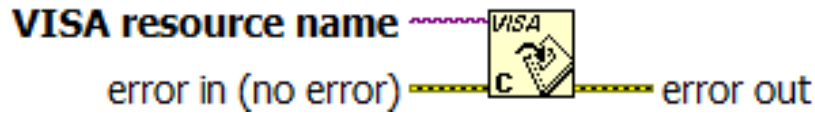


Figura 9 Terminales del bloque VISA Close.

Para establecer la separación entre cada cadena y el periodo de muestreo; se concatena a cada cadena un espacio en blanco por medio del bloque de concatenación de caracteres llamado Concatenate Strings, figura 10.

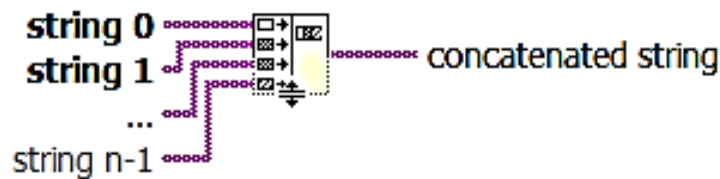


Figura 10 Terminales de la función Concatenate Strings.

Finalmente, interconectando los bloques anteriores se obtuvo la etapa de adquisición de datos implementada, figura 11.

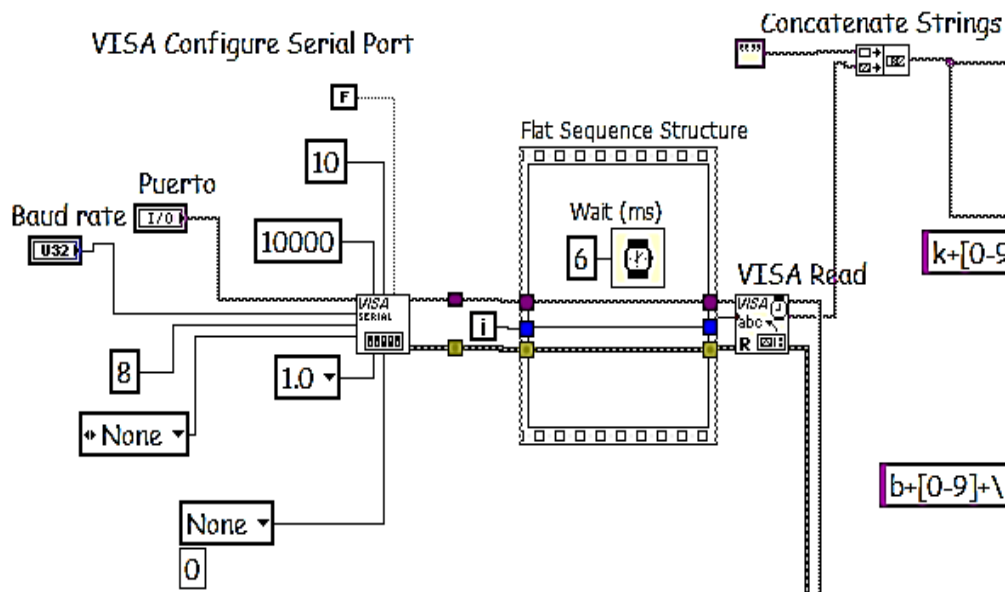


Figura 11 Etapa de adquisición de datos.

Es necesario mencionar, que para seleccionar el puerto de comunicación y la velocidad de transmisión de dispositivo bluetooth utilizado (Baud rate), se utilizaron un par de controles con el fin de poder cambiar estos parámetros libremente desde el tablero, figura 12.



Figura 12 Puerto de comunicación y velocidad de transmisión del dispositivo bluetooth.

### Etapa de separación de datos

La etapa de separación de datos consta de 3 partes: búsqueda de caracteres, extracción del valor de medición y conversión de string a número, figura 13.

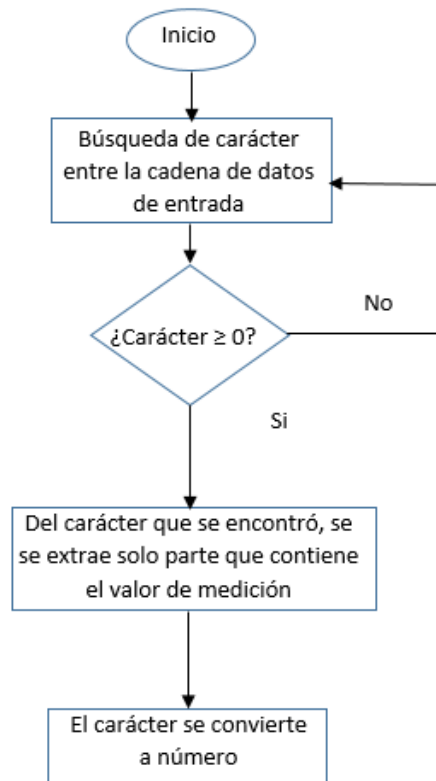


Figura 13 Diagrama de flujo de la etapa de separación de datos.

La finalidad de esta etapa es identificar y separar los caracteres que corresponden a cada sensor y que contienen la información del muestreo efectuado, este paso es necesario para posteriormente convertirlos a números lo cuales serán desplegados en el panel virtual.

Como primer elemento en esta etapa se encuentra el bloque llamado Match Pattern, cuya función es encontrar un carácter entre una cadena de caracteres, figura 14.

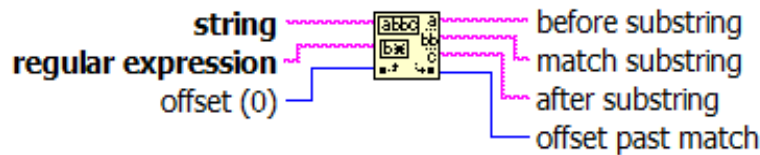


Figura 14 Terminales del bloque Match Pattern.

A la salida Match Substring del bloque Match Pattern se tiene el carácter que se le indicó localizar. Dicho carácter entra a un Case Structure que brinda la posibilidad de ejecutar o no una acción, la cual depende del cumplimiento de las condiciones preestablecidas. En este caso, la condición es que el carácter sustraído de la cadena sea mayor a cero (figura 15).

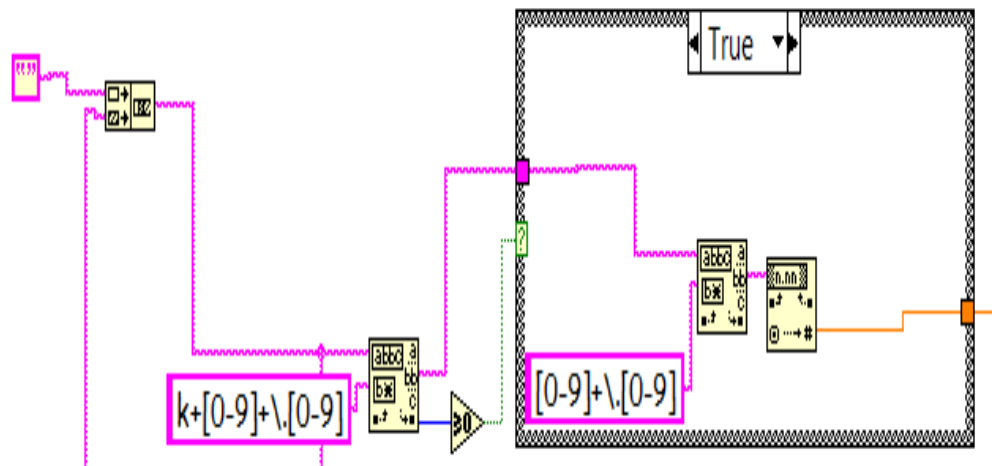


Figura 15 Etapa de separación de datos, condición para el Case Structure (círculo rojo).

La tarjeta electrónica que se usó para monitorear los sensores, envía los datos de cada sensor identificados por una letra, la cual puede ser de la “a” a la “l”,

puesto que la tarjeta tiene capacidad de monitorear doce sensores al mismo tiempo. El segundo Match Pattern dentro del Case Structure, ayuda extraer sólo el carácter que contiene el valor de la medición realizada por el sensor, eliminando la letra de distinción. Posteriormente el valor de medición es convertido de string a número a través del bloque Fract/Exp String To Number. El valor que se obtiene a la salida del bloque Fract/Exp String To Number, es el que se desplegará por medio de un indicador en la siguiente etapa.

### Etapa de despliegado de valores

La etapa de despliegado de datos consta de dos partes: escalamiento y visualización de los valores, figura 16.

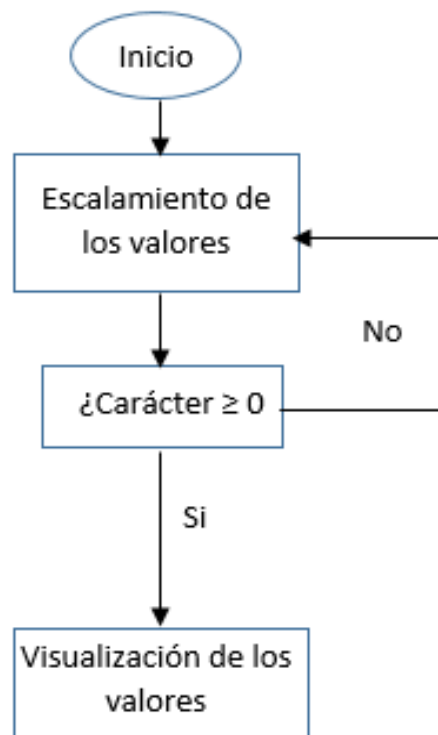


Figura 16 Diagrama de flujo de la etapa de despliegado de datos.

El número que se obtuvo en la etapa de separación de datos para cada sensor, se utiliza en esta etapa para desplegar los valores numéricos de las mediciones. Las cuales son: indicador de velocidad, nivel de carga de batería y sentido de avance del VE.

## Despliegado de valores de velocidad y nivel de carga de batería

La salida numérica del sensor de velocidad y del sensor de nivel de carga de batería, varían entre cero y cinco, por tanto, se multiplicó por veinte. Esto último, para poderlos escalar a la variación de 0 a 100, figura 17. Además, la señal numérica sirve como condicionante para entrar a un Case Structure, donde se encuentran los indicadores de velocidad y nivel de carga de la batería. La condicionante es que la señal numérica sea igual o mayor a cero.

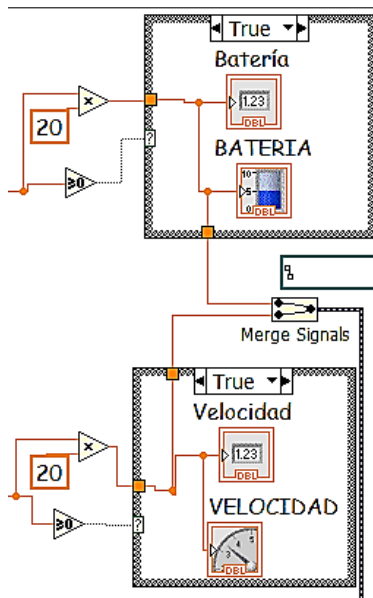


Figura 17 Etapa de despliegado de valores para velocidad y nivel de carga de la batería.

Para desplegar las mediciones de velocidad y carga de batería, se utiliza un indicador numérico y un indicador gráfico, figura 18.

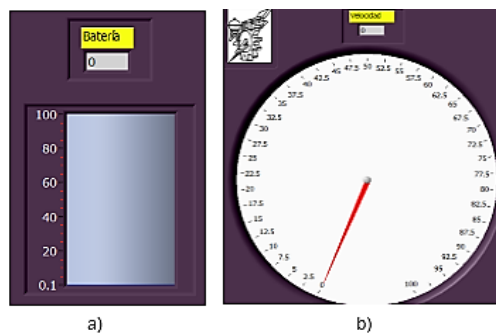


Figura 18 Indicadores para a) nivel de carga de batería y b) velocidad.

## Despliegado del indicador del sentido de avance del vehículo

La salida numérica de la etapa anterior, para el sensor que indica el sentido de avance (adelante, atrás o neutro) varía entre 0 y 5. Por tanto, se utilizaron las siguientes condiciones:

- Si el valor del sensor está por debajo de 2.5, el vehículo va hacia atrás.
- Si el valor del sensor es igual a 2.5, el vehículo está en neutro.
- Si el valor del sensor es mayor a 2.5, el vehículo va hacia adelante.

Si las condiciones son ciertas para cada uno de los casos anteriores, por medio de un Case Structure, se activa un indicador booleano, figura 19.

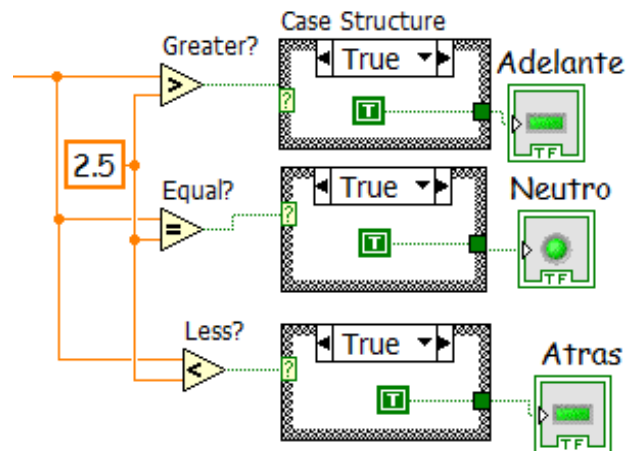


Figura 19 Etapa de despliegado del indicador de sentido de avance del vehículo.

La figura 20, muestra la apariencia de los indicadores del sentido de avance del vehículo.



Figura 20 Indicadores de sentido de avance del vehículo.



## Etapa de registro de mediciones

La etapa de separación de datos se consta de dos partes: concatenación de los valores medidos y registro de los datos, figura 21.

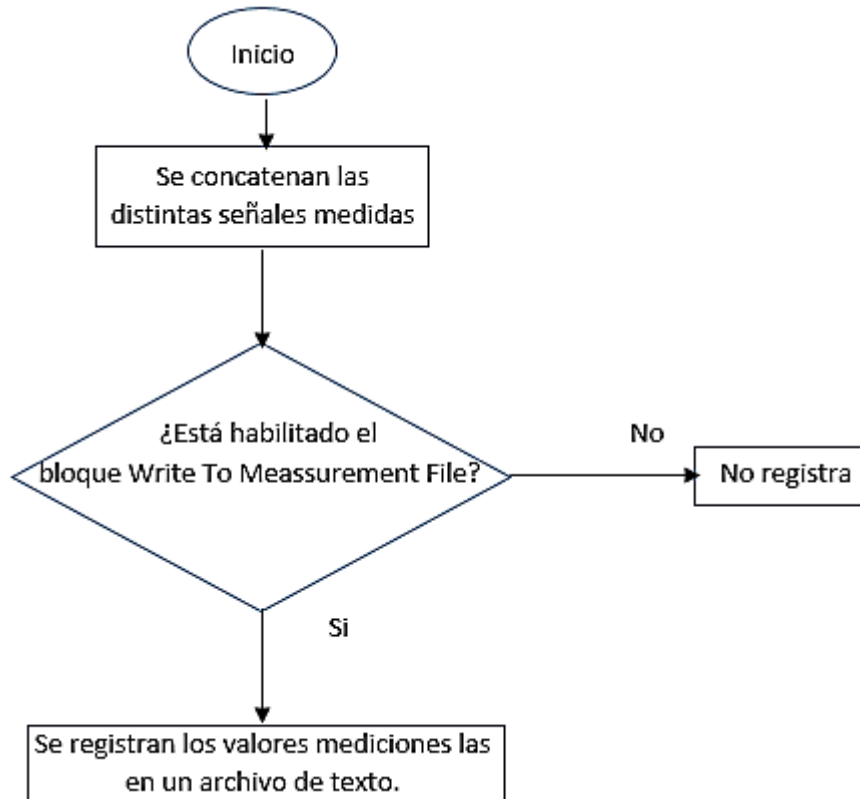


Figura 21 Diagrama de flujo de la etapa de registro de datos.

Con la finalidad de concatenar las señales medidas, se utilizó el bloque llamado Merge Signals, figura 22. Este bloque permite unir dos o más señales que se deseen grabar en el bloque de Write To Measurement File, figura 23. Este bloque permite escribir los valores de las mediciones en distintos formatos como lo son: .xlsx, .tdms, .lvm y .tdm.

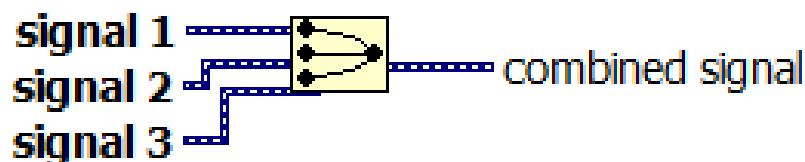


Figura 22 Terminales del bloque Merge Signals.

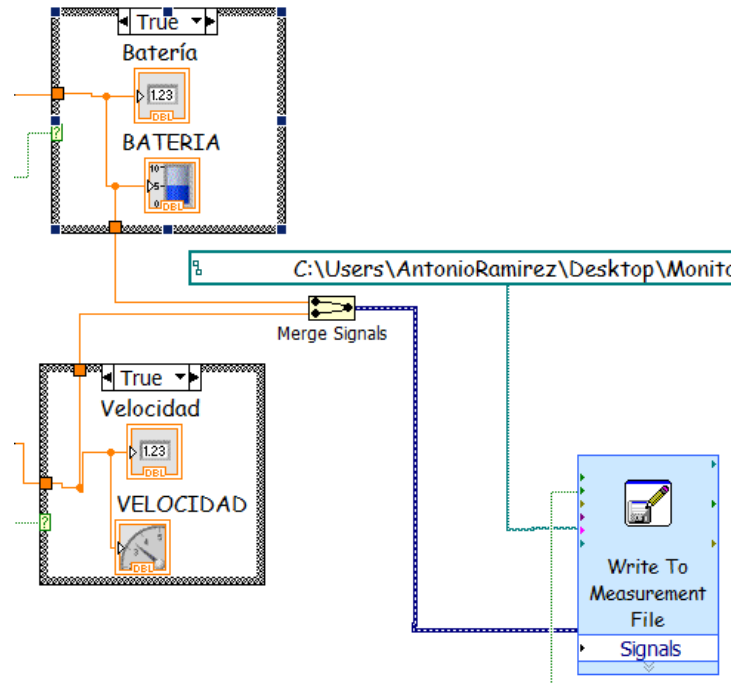


Figura 23 Etapa de registro de mediciones.

El archivo generado por el bloque Write To Measurement File, además de llevar el registro de mediciones, también ofrece la posibilidad de agregar cabeceras con información como son: tiempo, usuario, fecha, descripción, entre otros, figura 24.

```

Monitoreo: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Separator Tab
Decimal_Separator .
Multi_Headings No
X_Columns One
Time_Pref Absolute
Operator AntonioRamirez
Description Tiempo Batería Velocidad
Date 2016/04/17
Time 18:59:29.5666298866271972656
***End_of_Header***

Channels 2
Samples 1
Date 2016/04/17 2016/04/17
Time 18:59:29.5666298866271972656 18:59:29.5666298866271972656
X_Dimension Time Time
X0 0.0000000000000000E+0 0.0000000000000000E+0
Delta_X 1.000000 1.000000
***End_of_Header***
X_Value Untitled Untitled 1 Comment
0.000000 0.000000 0.000000
0.015001 0.000000 0.000000
0.032002 0.000000 0.000000
0.045003 0.000000 0.000000
0.058003 0.000000 0.000000
0.071004 0.000000 0.000000
    
```

Figura 24 Registro de mediciones en un archivo. lvm.

### 3. Resultados

El programa final realizado en LabVIEW se muestra en la figura 25. Asimismo, el tablero final para el vehículo eléctrico VE\_Lince 1 se muestra en la figura 26.

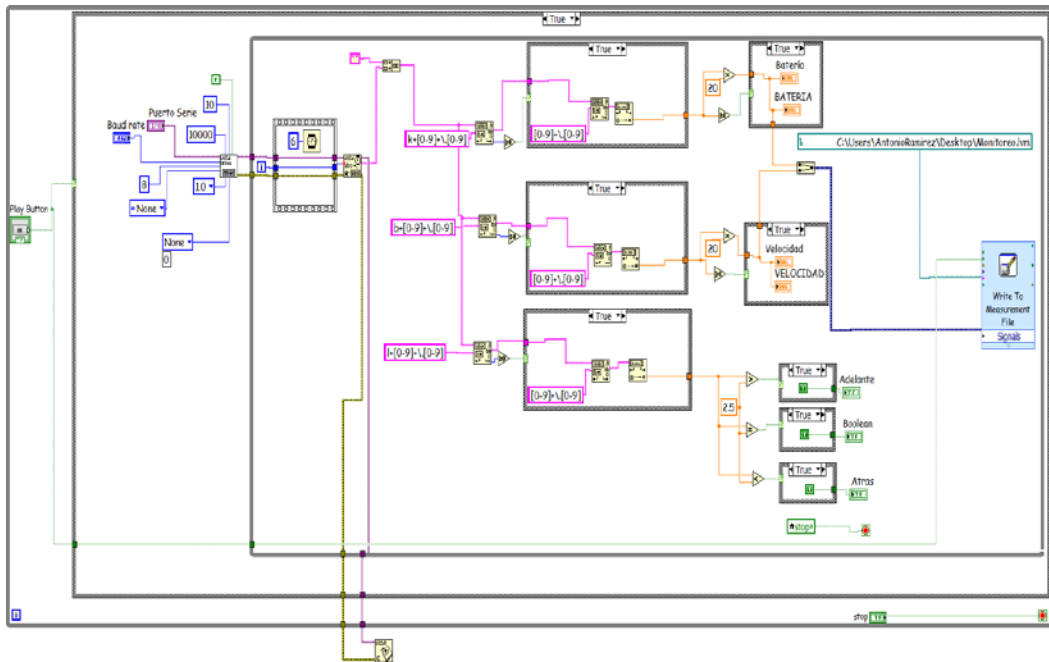


Figura 25 Programa completo del tablero diseñado en LabVIEW.



Figura 26 Aspecto del tablero diseñado en LabVIEW.

### 4. Conclusiones

Con el trabajo desarrollado, se comprobó la facilidad y rapidez de la programación visual que ofrece LabVIEW; lo que permitió brindar una solución

económica y sencilla para el tablero del vehículo eléctrico (VE\_Lince1). Asimismo, se mostró una herramienta sumamente amigable que establece la comunicación serial vía bluetooth con la tarjeta electrónica que realiza el monitoreo de los sensores. La programación en LabVIEW es muy versátil y se puede adaptar fácilmente a distintas ramas de investigación, además de ser de fácil aprendizaje. El sistema diseñado puede ser utilizado en otros sistemas de adquisición y despliegado de señales.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] De la aguja a la pantalla: Así ha evolucionado el tablero de los autos. <http://www.enter.co/lanzamientos/renault-media-nav/2014/renault-asi-ha-evolucionado-en-el-tiempo-el-tablero-de-los-autos/>. Mayo 2016.
- [2] G. Bayrak, M. Cebeci, "Monitoring a grid connected PV power generation system with LabVIEW". International Conference on Renewable Energy Research and Applications. 20-23 Octubre 2013. Pp. 562-567.
- [3] J. Zheng, X. Hu, H. Fang, "The application of LabVIEW in mine hydrology wireless monitoring system". IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications. 8-9 Mayo 2014. Pp. 505-507.
- [4] L. Guofang, C. Lidong, Q. Yubing, L. Shengtao, X. Junyu, "Remote monitoring system of greenhouse environment based on LabVIEW". International Conference On Computer Design and Applications. Volumen 2. 25-27 Junio 2010. Pp. 89-92.
- [5] N. Khera, S. Jain, "Development of LabVIEW based electrical parameter monitoring system for single phase supply". International Conference on Communication, Control and Intelligent Systems. 7-8 Noviembre 2015. Pp. 482-485.
- [6] S. Chabchoub, S. Mansouri, R. B. Salah, "Biomedical monitoring system using LabVIEW FPGA". World Congress on Information Technology and Computer Applications Congress. 11-13 Junio 2015. Pp. 1-5.
- [7] S. Buller, E. Karden, A. Lohner, R. W. De Doncker, "LabVIEW based universal battery monitoring and management system". Twentieth

International Telecommunications Energy Conference. 4-8 Oct. 1998. Pp. 630-635.

- [8] Y. Guo, S. Lin, M. Song, "Real Time Monitoring System of PLC for Production Line of Coin Cell Battery Based onLabVIEW". Second International Conference on Digital Manufacturing and Automation. 1-5 Agosto 2011. Pp. 881-884.

## **7. Autores**

Dr. Francisco J. Pérez Pinal, ha laborado como profesor investigador en instituciones como McMaster University (Canadá), Mohawk College of Applied Arts and Technology (Canadá), Universidad Politécnica de Pachuca (México), Instituto Tecnológico Nacional (México), y el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (México). Ha realizado estancias de investigación en Manchester University (UK) y el Illinois Institute of Technology (USA). Actualmente es autor de un libro, y es autor/co-autor de más de cuarenta artículos en revistas y/o congresos internacionales. Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1, CONACyT (2015) Primer lugar, Mejor Tesis Doctoral, área de eficiencia energética, IIE, CFE, FIDE, México (2009). Premio Nacional de Energía Renovable, área de innovación, Secretaría de Energía, SENER, México (2008). Becario COMEXUS-Fulbright García-Robles, (2006). Ha dirigido/co-dirigido doce proyectos científicos y tecnológicos nacionales/extranjeros relacionados con la industria aeronáutica, automotriz, y energía eléctrica con un monto total acumulado de cuatro millones de dólares.

Tlgo. Luis Antonio Ramírez Arredondo es Tecnólogo en Comunicaciones Electrónicas por el Centro de Estudios Tecnológicos Industrial y de Servicios Mexicano – Japonés (CETMEJA) No. 115. Actualmente cursa el 9no semestre de Ingeniería en Electrónica con especialidad en Automatización Industrial por el Instituto Tecnológico de Celaya.

# ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA TELE MEDICIÓN DE TEMPERATURA EN EL ALMACENAMIENTO DE GRANOS

***Gerardo Cázarez Ayala***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*gcazare2000@yahoo.com*

***Antonio Rodríguez Beltrán***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*ant\_rdgz@hotmail.com*

***Hugo Castillo Meza***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*hcastillo74@gmail.com*

***Sócrates Lugo Zavala***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*socrates.lugo@gmail.com*

***Miguel Enrique Ramírez Montenegro***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*miguel\_e\_ramirez\_m@hotmail.com*

***Jaime Fonseca Beltrán***

Instituto Tecnológico de Los Mochis  
*jfonsecab@hotmail.com*

***David Martínez López***

*soydml@yahoo.com.mx*

## Resumen

El presente trabajo describe el diseño e implementación de un sistema de entrada-salida distribuido, enfocado en el monitoreo de variables en silos para el

almacenamiento de granos como una alternativa a los sistemas de monitoreo tradicionales. El sistema está basado en el protocolo de comunicación inalámbrico Digimesh, el cual permite de operar en topologías de redes en malla. Asimismo, el sistema implementa un arreglo de sensores digitales de temperatura, para el monitoreo de esta variable en el interior del silo y es capaz de detectar zonas o sectores dentro del mismo, donde ocurran cambios repentinos en la temperatura del aire entre los granos y activar el sistema de aireación. Para esto, se utiliza el sensor digital DS18B20, que opera mediante bus 1-Wire, haciendo posible un arreglo de sensores de temperatura en línea de hasta 128, logrando cubrir las necesidades de cualquier silo para el almacenamiento de granos.

El sistema consta de dos tarjetas electrónicas, la primera de ellas actúa como unidad de adquisición de datos y se basa en un microcontrolador ATmega 32U4 con bootloader Arduino. La segunda, actúa como unidad de control central y está basada en un microcomputador Raspberry PI modelo B.

El sistema actúa de manera completamente automático, procesa la información y actúa el sistema de aireación o refrigeración del silo en función de la temperatura y humedad en el ambiente exterior, para mantener la temperatura y humedad dentro del mismo en los niveles óptimos, evitando el desarrollo de micro-organismos e insectos y salvaguardando la integridad de los granos almacenados.

**Palabra(s) clave(s):** Adquisición de datos, digimesh, e/s distribuida.

## 1. Introducción

La principal actividad económica en estado de Sinaloa es la agricultura, siendo las hortalizas como el tomate, papa, calabaza y chiles algunos de los principales productos que se producen en la región. De igual manera, los granos como el maíz, frijol y trigo ocupan una gran cantidad de la tierra cultivable en Sinaloa y tan solo en el caso del maíz se cultivan un poco más de 5.5 millones de toneladas en el ciclo de otoño-invierno cada año [1], logrando con esto posicionar al estado de Sinaloa con el título de *el granero de México*, por ser el principal

productor de granos en el país. Por otro lado, la capacidad de almacenamiento de los granos cosechados es inferior a la capacidad de cultivo tan solo de maíz y sin considerar los cultivos de otros granos como: trigo, frijol y sorgo. El principal método utilizado para el almacenamiento de la cosecha de maíz y otros granos en la región y en todo el país es en base a silos verticales metálicos o de concreto, los cuales son de diversas capacidades que van hasta 80,000 toneladas de maíz, diámetros de unos cuantos metros hasta decenas de metros y alturas de los silos que superan los 50 metros.

De acuerdo a datos de la SAGARPA y las asociaciones de agricultores en el estado de Sinaloa, la capacidad de almacenamiento instalada en el estado es suficiente para la producción esperada de maíz en 2015-2016, misma que se espera supere los 6 millones de toneladas. Sin embargo, existen diversa problemática que se presenta en el manejo y cuidado del grano posterior a la cosecha, entre estas se encuentran: generación de moho, desarrollo de microorganismos en el grano, proliferación de insectos en las cosechas almacenadas y hasta problemas con roedores, entre otras. La mayoría de estas situaciones se deben principalmente al mal manejo y cuidado de las cosechas, siendo la causa principal los altos niveles alcanzados de humedad y temperatura en el aire alrededor de los granos almacenados en un silo.

### **El silo de almacenamiento**

El silo metálico para almacenamiento de granos, es una estructura cilíndrica de diámetro y alturas diversas. Su capacidad de almacenamiento fluctúa entre unos cuantos cientos hasta decenas de miles de toneladas de granos. La capacidad de almacenamiento del silo se maneja en metros cúbicos ( $m^3$ ) y su capacidad en toneladas se determina en función de la densidad del grano del cultivo del cual se trate, como pudiera ser maíz, trigo y frijol entre otros. En la tabla 1, se incluyen datos sobre las densidades típicas de los principales productos agrícolas y granos almacenados a granel en silos [2] y la humedad recomendada.



Tabla 1 Densidades de granos y humedad recomendada.

Producto	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Humedad recomendada
Maíz	680-720	13%
Frijol	750-850	15%
Sorgo	670-760	12.5%
Trigo	750-840	13%
Cebada	550-690	14%
Avena	500-540	14%

### **Afectación de temperatura y humedad**

Como se mencionó anteriormente, el contenido de oxígeno, humedad y temperatura elevadas en los granos son las causas principales en la afectación de los granos almacenados. Esto puede contribuir de manera determinante para acelerar o retrasar los fenómenos de transformación bioquímica en el origen de su degradación. Se debe recordar que las cosechas o granos, son complejos agroecosistemas por la serie de interacciones producidas entre: luz, oxígeno, humedad, temperaturas y agentes bióticos (hongos e insectos que repercuten en la calidad del grano). En este sentido, los granos respiran, es decir, se produce energía y humedad, la cual tiende a acumularse en el propio lugar de la generación y conlleva el desarrollo de focos de calentamiento. Siendo esto, el primer indicio de un proceso degenerativo del grano almacenado.

Es posible determinar la influencia directa de altos niveles de humedad y temperatura en los granos almacenados sobre el ritmo de desarrollo de los insectos y microorganismos como: el moho, bacterias y levaduras. Mismos que dañan de forma dramática los granos. Asimismo, se afecta severamente el proceso de germinación precoz de los granos.

En la tabla 2, se ilustra el comportamiento de los granos almacenados, la afectación de los periodos de almacenamiento y buena conservación debido a los contenidos de humedad de los granos y el nivel de temperatura en el aire intergranular (entre granos).

Como puede observarse en la figura 1 se ilustra las curvas características para el almacenamiento y conservación segura de los granos en silos metálicos. En esta gráfica se interrelacionan la temperatura y la humedad intergranular y se destaca

que a menores niveles de humedad es posible conservar las cosechas a mayores temperaturas.

Tabla 2 Periodo de almacenamiento seguro en días.

DURACION DE ALMACENAMIENTO SEGURO EN SILO METALICO DE LOS GRANOS (DIAS).						
TEMPERATURA INTERGRANULAR						
HUM	5°	10°	15°	20°	25°	30°C
13 %				180	115	90
14 %			160	100	50	30
15 %			100	50	30	15
16 %		130	50	30	20	8
17 %		65	35	22	12	5
18 %	130	40	25	17	8	2
19 %	70	30	17	12	5	0
20 %	45	22	15	8		
21 %	30	17	11	7		
22 %	23	13	8	6		
23 %	17	10	7	5		
24 %	13	8	4	4		
25 %	10	3	6	3		

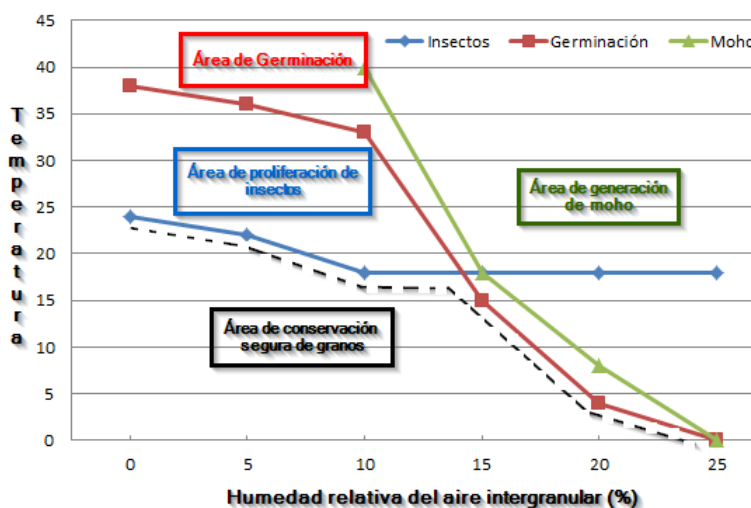


Figura 1 Gráfica para la conservación de los granos.

### Antecedentes Tecnológicos

En la actualidad, existen en el mercado una diversidad de sistemas enfocados al monitoreo de la temperatura en los sistemas de almacenamiento de granos. La

gran mayoría de ellos se basa en una estructura de tres elementos básicos: sensor de temperatura, unidad de adquisición de datos y cuarto de supervisión. Entre los elementos sensores más utilizados se destacan la termocopla y termistores NTC, mediante los cuales se mide la variable y se transmite a una unidad de adquisición de datos, donde se normaliza y representa la medida en unidades de temperatura, para su posterior procesamiento en las etapas de control y manejo de alarmas. Una vez procesada la información de los sensores, estas unidades de adquisición de datos tienen la capacidad de transmitir dicha información al cuarto de supervisión en la planta, en el cual se pueden realizar tareas de procesamiento gráfico, estadístico, control, manejo de alarmas y compartir dicha información a través de Internet.

Entre esta gran variedad de sistemas sobresalen *MyTemp* e *IEA SI-61-2K7*, dos de los sistemas de monitoreo de temperatura más populares en el mercado, ambos presentan una estructura típica de controlador lógico programable, modular y expansible, con soporte de hasta siete módulos de expansión para la adquisición de datos con capacidad de hasta 256 canales (termocoplas tipo "T") cada uno, módulos de relevadores opcionales, interface eléctrica RS-485 a 2 hilos, protocolo de comunicación serial Profibus L2-DP configurable, con soporte para comunicación estándar Modbus ASCII, con las cuales es posible implementar una red de hasta 254 unidades de adquisición de datos.

Básicamente, estos sistemas realizan un rastreo de datos en intervalos programables desde cada 8.5 hasta 1440 minutos, según convenga al usuario y los datos son enviados a cuarto de supervisión para su procesamiento, representación gráfica y almacenamiento.

En cuanto a la interfaz gráfica para el operador, típicamente está conformada por plataformas SCADA tales como *Wonderware In-Touch*, *US-DATA Factory Link*, *Intellution FIX*, *NI Lookout*, *Industrial LabVIEW* o cualquier otro software desarrollado a la medida que soporte el driver de comunicación MODBUS ASCII o RTU, mediante los cuales el desarrollador podrá implementar interfaces graficas intuitivas, fáciles de operar y con gran capacidad de realismo.

## **2. Desarrollo**

Este proyecto consta de diversas etapas en su desarrollo. En estas, se diseñaron las tarjetas de adquisición de datos y la tarjeta de interface para la comunicación inalámbrica y el monitoreo de las variables de temperatura del aire y humedad relativa del ambiente. Esto con la finalidad de determinar si es apropiado el activar el sistema de aireación para insuflar aire seco al interior del silo y con esto disminuir la humedad y la temperatura dentro del mismo.

### **Arreglo de sensores en el silo**

El sistema de monitoreo y adquisición de datos en el silo para almacenamiento de granos, se basa en un arreglo de sensores digitales de temperatura DS18B20 [3], mismos que se comunican a través de una interface digital a un solo cable, este es conocido como protocolo de comunicación 1-Wire.

Se diseñó un arreglo de sensores de temperatura interconectados en paralelo al bus de comunicación. Cada arreglo de sensores está predispuesto en líneas, en las cuales cada sensor se encuentra posicionado a una distancia de 4 metros y se cubre la altura total del silo de granos según se requiera.

De igual manera, se instalan diversas líneas de sensores con las mismas características, las cuales deberán cubrir la totalidad del espacio de almacenamiento en el silo, respetando las distancias entre sensores que deberán ser de entre 4 o 5 metros lineales en sentido vertical y entre 5 y 6 metros en dirección horizontal, lo cual representa para cada sensor en el arreglo total de sensores en el interior del silo un volumen máximo de 150 metros cúbicos. En la figura 2 se ilustra la estructura general de un silo para el almacenamiento de granos, maíz en este caso. En la misma, se destacan los arreglos de sensores de temperatura digitales, posicionados de forma vertical desde la parte superior del silo y cubriendo hasta la parte inferior del mismo. Dichas líneas de sensores son interpuestas a distancias horizontales máximas de 6 metros de otras líneas. El número de sensores por línea estará establecido por la altura del silo, siendo típico entre 30 y 40 metros de altura y el número de líneas de sensores por el diámetro o base del silo, siendo 25 metros de diámetro una medida típica.

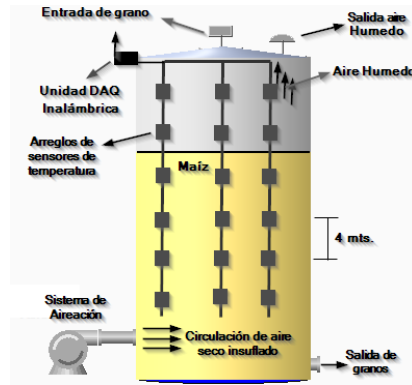


Figura 2 Estructura silo para almacenamiento de granos.

En la figura 2, se ilustra la ubicación del arreglo de líneas de sensores de temperatura superpuesto en un silo.

Esta propuesta, al igual que los sistemas tradicionales, no contempla el monitoreo de la variable humedad en el interior del silo. Debido a la existencia de polvo e impurezas entre los granos, es difícil la medición de dicha variable, ya que cualquier sensor de humedad relativa típico, presentaría lecturas erróneas o se saturaría por acción del polvo e impurezas. En los centros de acopio, la humedad se mide de forma periódica cada 30-60 días mediante sondas especiales basados en el principio de conductividad o capacitancia. Lo anterior con la finalidad de corroborar el comportamiento indicado por el sistema de medición de temperatura y su correlación con la humedad en el interior del silo.

### Unidad de adquisición de datos

Se diseñó e implementó un sistema para la adquisición de datos y control, la cual está basada en una tarjeta electrónica con un microcontrolador ATmega 32U4 [4] con bootloader *Arduino* pre-cargado [5].

La función principal del sistema de adquisición de datos es la de controlar el arreglo de sensores de temperatura que se instala en el interior del silo, procesar la información y transmitirla a la tarjeta de control central del sistema. Para esto, hace uso de una interfaz de comunicación inalámbrica basada en protocolo Digimesh y el módulo de comunicación Xbee Serie 1, mediante los cuales se

implementa el sistema de control distribuido para la automatización y control del almacenamiento de granos en silos.

Dicha tarjeta desarrollada cuenta con las siguientes características:

- 1 Interfaz de comunicación USB para programación.
- 1 Socket para Módulo de comunicación inalámbrica.
- 6 canales análogos con precisión de 10 bits.
- 6 entradas-salidas digitales.
- 2 salidas PWM de 10 bits para control.
- 1 Interfaz de comunicación serial RS-485 half dúplex.
- Salidas de voltaje acondicionado 5v y 3.3 V.

En la figura 3 se ilustra el diseño PCB de la interfaz para la adquisición de datos y control implementada y se destaca el microcontrolador base de la tarjeta y el socket para instalación del módulo de comunicación inalámbrica, típicamente Xbee Digimesh [6], mismo que pudiera ser cualquier otro con factor de forma Xbee. Esta tarjeta es similar en características generales a *Arduino Fio* a excepción de que *Arduino Fio* está basada en un microcontrolador ATmega 328P, corre a 8Mhz, maneja niveles lógicos de 3.3 volts y la organización del pinout de la tarjeta es diferente al sistema propuesto.

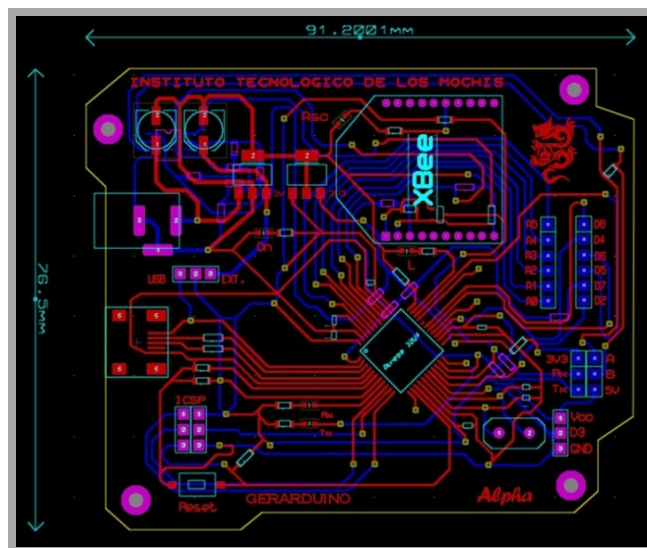


Figura 3 PCB tarjeta para adquisición de datos y control.

En la figura 4 se ilustra la tarjeta de adquisición de datos y control completamente terminada. Se destaca, el microcontrolador ATmega 32U4 instalado y el módulo de comunicación inalámbrica Xbee en la parte superior. Aquí se destaca la interface USB micro de la tarjeta requerida para efectos de programación de la misma. Cabe mencionar que esta tiene como función básica en el sistema de monitoreo y control de temperatura y humedad en el silo la toma de datos del arreglo de sensores digitales y de ser necesario puede actuar como unidad de control.



Figura 4 Unidad de adquisición y control.

En su función como sistema de adquisición de datos, adquiere los datos de los sensores de temperatura DS18B20 y determina los valores promedio por nivel del silo, es decir, un nivel equivale del silo equivale a el promedio de los sensores de todas las líneas que se encuentran en la misma altura. Una vez determinados los valores de temperatura medios de cada uno de los niveles, estos son transmitidos de forma inalámbrica a la *Unidad Central* del sistema, la cual se basa en un microcomputador Raspberry PI [7, 8].

Cuando la tarjeta electrónica se encuentra actuando como unidad de control, se hace uso de una salida digital con una interfaz de potencia para actuar el sistema de aireación. El sistema de aireación se basa en un ventilador y motor trifásico de 30 amperes. Este sistema, es el encargado de insuflar aire seco (con humedad

menor al 60%<sup>1</sup>) del exterior al interior del silo. Este aire insuflado a presión, viaja a través de los granos de maíz, expulsando el aire intergranular húmedo hacia la parte superior del silo y posteriormente expulsándolo a través de una escotilla de salida. Todo esto sucederá, solamente si la humedad exterior ambiental es menor de 60%<sup>1</sup>. Es durante las noches, cuando se presenta esta condición. De otra manera, se estaría agregando humedad del exterior al interior del silo.

La unidad de adquisición de datos opera de forma particular en cinco modos de operación básicos, en los cuales desarrolla las diferentes tareas requeridas en el sistema. En la figura 5, se observa un diagrama de flujo de estados el cual describe la funcionalidad de esta unidad.

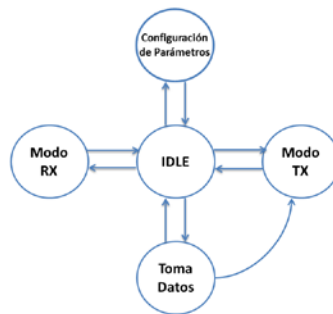


Figura 5 Diagrama de flujo.

El estado de No Operación (IDLE), es el estado en el cual la unidad DAQ se encontrará todo momento en el cual no realiza tarea alguna, solo se encuentra en espera de que ocurra algún evento para atenderlo. Cabe destacar que no se encuentra en algún estado de ahorro de energía o dormido, por las características de la aplicación. En el estado de configuración de parámetros se lleva a cabo el establecimiento de los parámetros para el procesamiento de los datos como lo es establecimiento de los intervalos de muestreo de sensores y de transmisión de datos a la unidad de control central, entre otros.

Modo de recepción, es el estado en el cual se reciben y procesan los paquetes de información que llegan a través del enlace inalámbrico y son decodificados en función de la diferentes comandos establecidos para el muestreo de datos,

<sup>1</sup> SAGARPA establece 70% de humedad relativa del aire como máximo para activar aireación en el Silo de almacenaje. En la zona costera del norte de Sinaloa, la mayoría de los centros de acopio y almacenaje operan con el 60% como límite por motivos de seguridad.



establecimiento de intervalos de envío de la información a la unidad de control central u órdenes de muestreo de datos en demanda, entre otros.

Al modo de toma de datos se accede mediante dos eventos: por evento del intervalo de muestreo o por comando de muestreo en demanda. El primero de ellos se basa en un temporizador el cual dispara el evento y se accede a la adquisición de los datos y al procesamiento de la información. En el segundo caso, se debe a un comando que se recibe desde la unidad de control central y obliga a la unidad DAQ a la toma de datos y transmisión de los mismos.

El modo de transmisión de la unidad se accede mediante dos eventos: el intervalo de transmisión de datos establecido y por un comando de toma de datos en demanda. El primero de ellos puede ser igual en tiempo al establecido en el intervalo de muestreo periódico. Un comando de muestreo en demanda obliga a una transmisión de los datos de forma inmediata.

### **Unidad de control central**

El sistema distribuido inalámbrico cuenta con una tarjeta de control central, cuya funciones básicas en el sistema son: concentrar la información del estado de la temperatura en el interior de los silos para el almacenamiento de granos, realizar las acciones de control, generar los comandos o secuencias de activación de los sistemas de aireación para ser enviados a las unidades de control en particular y atender las necesidades de requerimientos de información de las aplicaciones clientes que soliciten información del proceso a través de enlaces Ethernet.

La unidad de control central, se basa en un microcomputador Raspberry PI modelo B, la cual es una computadora de tamaño reducido y altas prestaciones operando bajo una distribución ligera del sistema operativo Linux. Así mismo, se diseñó e implementó una tarjeta electrónica cuya función básica es la de actuar como interface de sensores y entradas-salidas para la Raspberry PI. Esta tarjeta desarrollada fue basada en un microcontrolador ATmega 32U4 con bootloader Arduino y contiene sensor de humedad relativa del aire, sensor de temperatura y un sinfín de entradas análogas, entradas-salidas digitales para manipulación de

sensores y actuadores si es el caso. Lo anterior con motivos de centralizar las funciones de alto nivel al computador Raspberry y la interface con sensores ambientales, actuadores e interface de comunicación inalámbrica a la tarjeta interfaz desarrollada.

Cabe destacar, que esta tarjeta de interfaz forma parte de lo que llamamos *Unidad de Control Central* en conjunto con la Raspberry PI y la comunicación entre las dos se lleva a cabo por medio de una conexión serial I<sup>2</sup>C, actuando la Raspberry como Maestro y la tarjeta basada en Arduino como Esclavo.

En la figura 6 se ilustra la tarjeta de interfaz de la unidad de control central y destacan el microcontrolador en el cual se basa, el sensor de humedad y temperatura ambiental, socket del módulo de comunicación e interfaces de entradas-salidas digitales y entradas análogas.

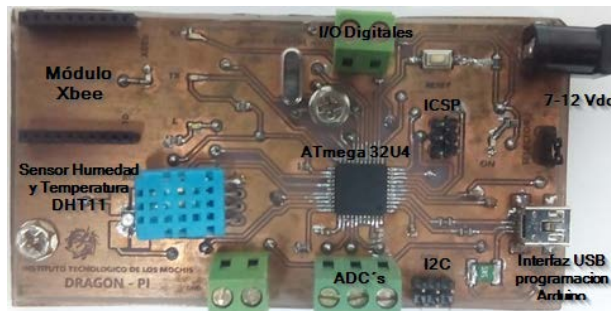


Figura 6 Tarjeta Interfaz Unidad de Control Central.

En la figura 7, se muestra la unidad de control central, constituida por la tarjeta Raspberry PI y la tarjeta de interfaz desarrollada.

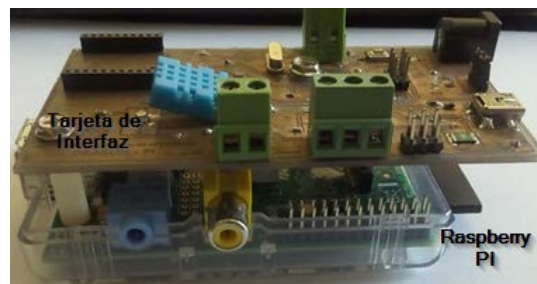


Figura 7 Unidad de Control Central.

En esta unidad de control central, la tarjeta Raspberry es la unidad maestra y es la encargada de concentrar toda la información de estado de las variables en los

silos de almacenamiento de granos, se comunica con la unidades de adquisición de datos a través de un módulo de comunicación inalámbrica en el socket Xbee dispuesto en la tarjeta interfaz, en esta misma tarjeta, se cuenta con un sensor DHT11 para medir la temperatura y humedad relativa del medio ambiente y es en base a la humedad exterior del silo como se determina activar el sistema de aireación, es decir, el sistema se activa solamente si la condiciones de temperatura en el interior del silo lo requiere, si y solo si la humedad del ambiente exterior es menor del 60%. Lo anterior para evitar ingresar aire húmedo al interior del silo y afectar la calidad del grano almacenado.

Cabe destacar que la tarjeta de control central puede concentrar la información de múltiples unidades de adquisición de datos, donde cada una de ellas, adquiere los datos de un silo en particular, por lo cual, el sistema puede monitorear y controlar una batería o conjunto de silos para el almacenamiento de granos dispuestos en el área geográfica de la aplicación.

De igual manera, la unidad central, tiene la capacidad operar de forma automática monitoreando el estado de los silos y generando las secuencias de control para activar los sistemas de aireación del silo que así lo requiera. También, es capaz de permitir el monitoreo y la supervisión remota del proceso a través de enlaces Ethernet desde aplicaciones cliente desarrolladas con tal motivo.

En la figura 8 se ilustra el sistema de control distribuido, aplicado en una batería de silos para el almacenamiento de granos, se destacan las unidades de adquisición de datos DAQ inalámbrica, la unidad de control inalámbrica y la unidad de control central basada en la Raspberry PI, las cuales se comunican a través de la red inalámbrica basada en Digimesh. Una vez los datos son concentrados en la unidad de control central, estos están disponibles para las aplicaciones clientes a través de Ethernet o WiFi en la Raspberry.

En la figura 9 se ilustra un diagrama de flujo que describe en forma general la funcionalidad del software desarrollado para operar en la unidad de control central. Básicamente, la unidad de control central opera en un ciclo infinito al cual se entra una vez que es determinada la existencia de unidades de adquisición de datos en la red Digimesh. Para esto, al iniciar operaciones la unidad central establece los

parámetros por defecto del sistema de monitoreo de temperatura, tales como periodo de muestreo de datos de las unidades de adquisición de datos, intervalo de envío de paquetes de información a la unidad central, modos de operación de las unidades DAQ entre otros. Posteriormente lleva a cabo el procedimiento de descubrimiento de unidades DAQ en la red, para esto, transmite un paquete de descubrimiento de nodos en la red (comando 20), mismo que interpretado por la totalidad de unidades presentes en la red, quienes responden con paquete de muestreo de datos genérico. De no encontrarse elementos en la red, la unidad central continúa intentando descubrir nodos en la red.

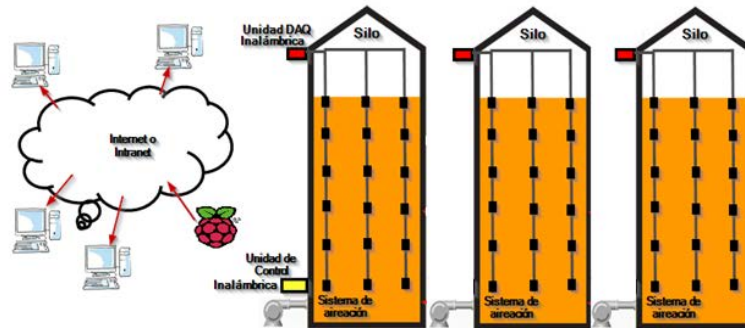


Figura 8 Sistema de control distribuido múltiples silos.

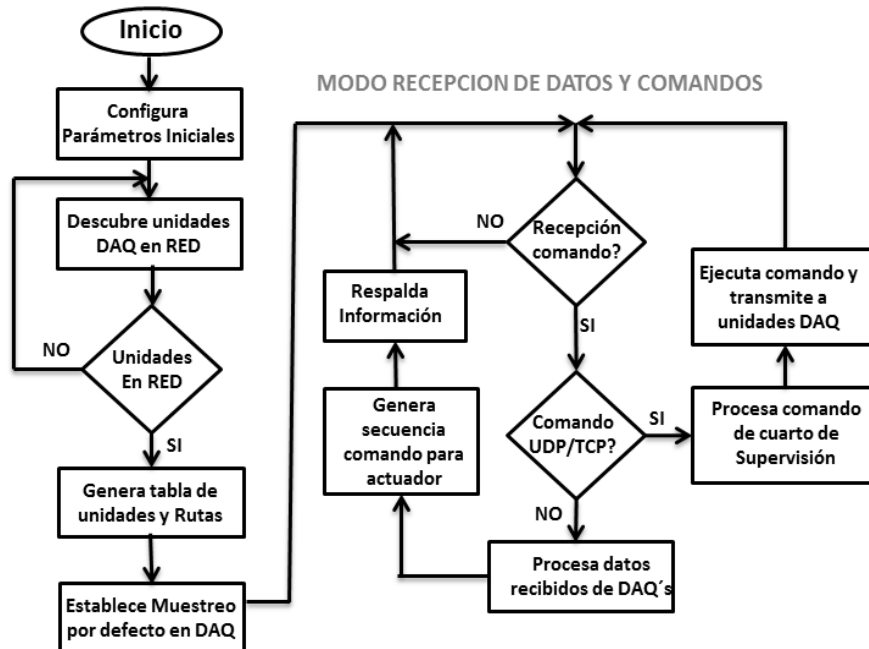


Figura 9 Diagrama flujo funcional de unidad de control central.

Una vez descubierta la red, genera tabla de unidades presentes en la red y establece las rutas críticas de ser necesarias.

Posterior a esto, la unidad central entra al modo de recepción, el cual consiste en un ciclo infinito, donde espera la recepción de comandos desde el cuarto de supervisión a través de enlaces UDP/TCP, o paquetes de información provenientes de las unidades DAQ por medio de su interfaz inalámbrica Digimesh.

### Protocolo de comunicación

Las unidades central y de adquisición de datos y control en el sistema se comunican a través de la red inalámbrica y hacen uso de un protocolo de comunicación basado en secuencias en símbolos ASCII. En la ecuación 1, se describe el formato general del protocolo de comunicación diseñado para que la unidad central (Raspberry PI) envíe comandos u órdenes sobre tareas a realizar las unidades de adquisición de datos y control.

$$\begin{array}{ccccccc} 1 & 1 & 1-3 & 2 & & & N \text{ bytes} \\ \langle \text{Marca Inicio} \rangle & \langle \text{Tamaño} \rangle & \langle \text{sil} \rangle & \langle \text{CMD} \rangle & \langle \text{ARGUMENTOS} \rangle & & \end{array} \quad (1)$$

En las ecuaciones 2 y 3 se describe la respuesta a un comando de toma de muestras enviado por la unidad central a una unidad de adquisición de datos y control.

$$\begin{array}{cccccccc} 1 & 1 & 1-3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ \langle \text{M} \rangle & \langle \text{T} \rangle & \langle \text{sil} \rangle & \langle \text{TN1} \rangle & \langle \text{TN2} \rangle & \langle \text{TN3} \rangle & \langle \text{TN4} \rangle & \langle \text{TN n} \rangle \end{array} \quad (2)$$

$$\sim \text{S1/25.6/26.0/26.5/26.0/26.5/27.0/26.0} \quad (3)$$

Cabe destacar que la marca de inicio del paquete denotado en las ecuaciones 1 y 2 como M, es fija es representada por el símbolo tilde (~). Asimismo, el byte correspondiente al campo de tamaño es el símbolo ASCII que corresponda al número de caracteres en la secuencia, contados a partir del número de la unidad y hasta el fin de la secuencia y es mediante este, la manera de proporcionar a las unidades de control y adquisición de datos un mecanismo para determinar la cantidad de bytes a leer en el buffer de recepción serial.

El campo correspondiente a <sil0> o unidad destino-origen, está determinado por 1 a 3 caracteres ASCII (tabla 3) y describe el origen o destino del paquete de datos, el cual puede tratarse de un comando a ser ejecutado en las unidades de control y adquisición o en su defecto de un paquete de datos muestreados en la unidad origen indicada en este campo.

Tabla 3 Códigos de comandos en protocolo de comunicación.

Descripción del comando	Código del Comando	Secuencia ASCII generada por el comando
Descubrimiento de nodos en red	<20>	<M><T><255>/<20> ~♣255/20
Muestreo de datos por demanda	<21>	<M><T><11>/<21> ~♣11/21
Muestreo Periódico	<22>	<M><T><11>/<22>/<30> ~■11/22/30
Respuesta a comando de muestreo de datos (por demanda y periódico)		<M> <T> <sil0>/<TN1>/<TN n> ~←11/26.0/26.5/25.6/25.0/25.5
Set actuador	<23>	<M><T><11>/<23>/<2> ~•11/23/2
Reset actuador	<24>	<M><T><11>/<24>/<2> ~•11/24/2
Set PWM	<25>	<M><T><11>/<25>/<2>/<valor> ~♂11/25/2/100

### 3. Pruebas y resultados

El sistema de control distribuido inalámbrico fue sometido a diversas pruebas entre las cuales se destacan las pruebas de comunicación en la red inalámbrica y la prueba de adquisición de datos.

La primera de ellas comprendió en el sistema de datos instalado en un silo para el almacenamiento de maíz, en el cual se instaló una unidad de adquisición de datos con un arreglo de sensores de temperatura en 5 líneas con 6 sensores cada una de ellas. La prueba de comunicación consistió en tomar la muestra de datos del arreglo de los 30 sensores de temperatura y transmitirlos a la unidad de control central cada 2 minutos durante 48 horas continuas, lo cual llevó a un total de 1440 operaciones de comunicación de datos en la red inalámbrica Digimesh y almacenadas en archivo de texto con hora y fecha. Cabe destacar que de acuerdo a los registros de las operaciones de comunicación en la red la tasa de éxito fue del 100%, asimismo, en la cobertura de la red del sistema bajo prueba

coexistió con una red inalámbrica basada en WiFi configurada para operar en el canal 1(2.401 a 2.423 GHz), el cual incluye la frecuencia de trabajo configurada en la red de comunicación Digimesh Canal "C" (2.4155 a 2.4185 GHz). Lo anterior con la finalidad de determinar la robustez de la red de comunicación establecida entre la unidad DAQ, la unidad de control y la Unidad de control Central basada en Raspberry PI. En cuanto a la prueba de adquisición de datos, esta fue realizada en el interior del silo para el almacenamiento de granos completamente vacío y sellado y los valores promedio de temperatura obtenidos en cada nivel del silo presentaron una desviación de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  con respecto a las lecturas y registros del sistema de monitoreo tradicional basado en termo-coplas. Para esto, se determinó el valor promedio de todos los sensores en el silo que se encontraban a la misma altura en cada una de las líneas de sensores, por lo cual, se obtienen 6 niveles compuestos por 5 sensores DS18B20 que registran las temperaturas del silo a esa altura y el promedio de los valores de todos estos equivalen al valor registrado como promedio de temperatura del nivel. En la figura 10 se ilustran los resultados obtenidos de las temperaturas en un día.

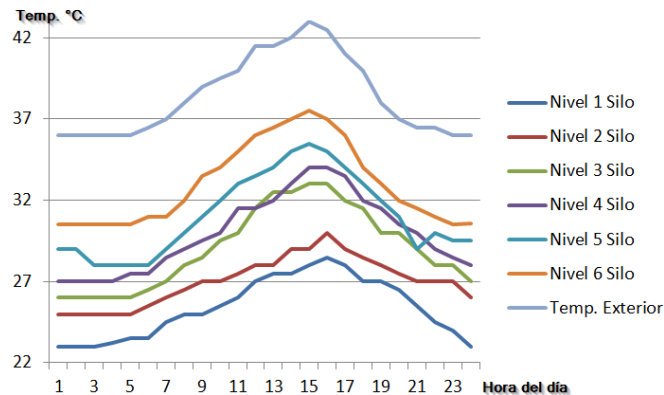


Figura 10 Lecturas de Temp. Promedio por hora/nivel en silo.

#### 4. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos en las pruebas realizadas podemos apreciar que el sistema desarrollado cuenta con un grado de precisión aceptable y creemos que la desviación en los datos obtenidos de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  se deben principalmente al margen de error natural del sensor utilizado DS18B20, el cual,

al ser un sensor digital, carece de un mecanismo o método para ajuste y/o calibración. En cuanto a la tasa de éxito del 100% de la prueba de comunicación en la red inalámbrica, esta muestra el alto grado de confiabilidad de este tipo de redes y del protocolo de comunicación Digimesh. Cabe destacar, que en la prueba de comunicación en la red inalámbrica se propició la coexistencia de otra red inalámbrica en el mismo espectro de frecuencia, con la finalidad de que la prueba de comunicación se realizara bajo estrés y permitiera observar el grado de robustez de este tipo de redes, como en [9, 10, 11].

En este sentido, el sistema alternativo propuesto lleva a cabo la misma tarea de monitoreo de temperatura que los sistemas tradicionales disponibles en el mercado, haciendo uso de la misma estructura de configuración de sensores dispuestos en cables acerados colgando desde el domo superior del silo, pero utilizando sensores de temperatura digitales en vez de termocoplas o termistores, los cuales cuentan con capacidad de comunicarse en red a través de un solo hilo de comunicación (1-Wire), más precisos, sin necesidad de calibrarse, más confiables y económicos. Este sistema utiliza una unidad de adquisición de datos basada en la plataforma Arduino, con la capacidad de operar en redes malladas y de manejar de forma eficiente un arreglo de sensores de hasta 128 a través de un solo hilo, suficientes para cubrir las necesidades de un silo de almacenamiento. Esto a diferencia de los sistemas tradicionales que requieren de un gran número de canales analógicos (uno por cada sensor, con precisión de 16 – 24bits) para adquirir la variable, además del tiempo y recursos requeridos para normalizar dichas medidas, lo cual en el sistema propuesto es completamente transparente para la unidad de adquisición, en el sentido de que al utilizar un sensor digital este transmite la información ya normalizada.

En cuanto a la estructura física de los sistemas tradicionales, basados en PLC, modulares y expansibles, se requiere utilizar gabinetes de protección para los módulos del CPU y canales analógicos y debido a su gran tamaño, estos gabinetes tradicionalmente se instalan en piso al pie del silo, estos sistemas tienen capacidad para manejar múltiples silos. Esta ubicación de la unidad de adquisición



de datos a larga distancia de los sensores, puede generar un inconveniente en la lectura de datos de alguno de los silos.

El sistema propuesto, está concebido para que la unidad de adquisición de datos sea ubicada en el domo superior del silo y una en cada uno de los silos, en el caso de múltiples silos en la planta, ya que por su pequeño tamaño permite ser montada dentro de un pequeño gabinete de protección lo más cercanamente posible del arreglo de sensores y por medio de su puerto de comunicación inalámbrica transmitir los datos a la unidad central y de control única en el sistema. El sistema incluye una unidad de control central y procesamiento de información, basada en un microcontrolador Raspberry Pi provista de comunicación inalámbrica, a través de la cual interactúa con las unidades de adquisición de datos, quienes transmiten los datos adquiridos para que sean procesados, representados de forma gráfica y almacenada según se desee.

Esta propuesta presenta múltiples características y beneficios respecto a los sistemas tradicionales en el mercado, entre los cuales destacan: tecnológicamente actualizado, comunicación inalámbrica y capacidad de operar en redes malladas, tamaño reducido, menor peso, unidades de adquisición de datos fáciles de ubicarse en puntos elevados, unidad central única para concentrar toda la información del sistema y enviarlo de forma segura a cuarto de control, mucho más económico, básicamente una fracción del costo de los sistemas tradicionales.

Finalmente, esperamos que con la implementación de este tipo de sistemas se permita optimizar la automatización y el monitoreo de los granos almacenados y conlleve a la reducción de los costos de operación en el cuidado de los granos almacenados en base a la inversión en el sistema de monitoreo y su mantenimiento, como por la detección temprana de incrementos de temperatura y humedad en el interior del silo. A pesar de que este el sistema aún se encuentra en una etapa de prueba y en su primer prototipo, se está trabajando en incrementar el grado de confiabilidad y robustez del sistema, con la finalidad de que en un futuro cercano sea posible su comercialización en las empresas en el ramo.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] Almacenamiento y conservación de granos y semillas, SAGARPA, Subsecretaria de desarrollo rural. México. 2011.
- [2] H. Castro García, E. Paredes Hernández, Manual para el manejo de granos almacenados en silos metálicos y plagas en postcosecha. 2009. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- [3] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Rev.: 042208, Maxim Integrated. <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Marzo 2016
- [4] ATmega 32U4 microcontroller Datasheet, Atmel Corporation. [http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-7766-8-bit-AVR-ATmega16U4-32U4_Datasheet.pdf). Marzo 2016.
- [5] Massimo Banzi, Introducción a Arduino. 2012. ORELLY-ANAYA. España.
- [6] XBee®/XBee-PRO® DigiMesh™ 2.4 RF Modules Datasheet. Digi International Inc. USA. 2010.
- [7] Maik Schmidt, Raspberry Pi, A quick-Start Guide. Second Edition. 2014. USA.
- [8] Simon Monk, Programming the Raspberry Pi, Getting Started with Python. 2013. USA. McGraw-Hill.
- [9] F. L. Lewis, Wireless Sensor Networks, Smart Environments: Technologies, Protocols and Applications. 2004. ed. D. J. Cook and S. K. Das, John Wiley. New York.
- [10] J. de D. Benítez, G. M. Gloza, E. O. Sosa, D. Godoy, "Conectividad WSN: Implementación de un Middleware WSN-IP-WWW", XV Workshop de investigadores en ciencias de la computación. Paraná. 2013.
- [11] E. Doebeling, Measurement systems: application and design. 1976. McGraw Hill. New York. Pag. 772.

## 6. Autores

M.C. Gerardo Cázarez Ayala obtuvo su título de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica por el Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Antonio Rodríguez Beltrán obtuvo su título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional.

Hugo Castillo Meza obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Sistema Automáticos de Control, en el Instituto Tecnológico de Mazatlán.

Sócrates Lugo Zavala obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Los Mochis.

M.I.I. Miguel Enrique Ramírez Montenegro obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Industrial con especialidad en automatización por el Instituto Tecnológico de Los Mochis.

Jaime Fonseca Beltrán obtuvo su título de Ingeniero Electrónico en Sistemas Digitales por el Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez.

David Martínez López, alumno del noveno semestre de la carrera de Ingeniería en Electrónica del Instituto Tecnológico de Los Mochis.

# **MEDIDOR DE PH, ELECTRO-CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS**

***Raymundo Barrales Guadarrama***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*rbg@correo.azc.uam.mx*

***Nicolás Reyes Ayala***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Ezequiel Melitón Rodríguez Rodríguez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Víctor Rogelio Barrales Guadarrama***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Alan Jorge Medina Blancas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*alanmb20@yahoo.com.mx*

## **Resumen**

Se propone un instrumento que permita monitorizar los niveles de pH, temperatura y conductividad eléctrica en cultivos hidropónicos de raíz flotante para que un agricultor pueda controlar los niveles de estas variables en la solución nutritiva del cultivo, los cuales han de mantenerse dentro de rangos específicos para evitar la muerte de la planta. Esta monitorización se hace de forma inalámbrica, haciendo uso de un iPhone. El instrumento mide con fiabilidad los niveles de pH en el rango de 5.5 a 6.5 y los niveles de conductividad eléctrica de 1.5 a 3 mS/cm con incertidumbres del 10% para cada mesurando y que son los

indicados para cultivos hidropónicos. Se llevó a cabo una investigación para reducir las pérdidas de señal de la sonda pH y la reducción de la polarización y la dependencia de componentes capacitivas en la sonda de conducción eléctrica. Además, la selección juiciosa de los materiales y la capacidad de comunicación inalámbrica del instrumento han resultado en características con ventajas sobre los modelos comerciales como la miniaturización, el bajo costo, la fiabilidad y la capacidad de medición simultánea.

**Palabra(s) Clave(s):** Conductividad eléctrica, hidroponía, Bluetooth de baja energía, pH, temperatura, Smartphone.

## **1. Introducción**

La hidroponía es un método utilizado para cultivar plantas usando disoluciones minerales, en lugar de suelo agrícola, donde las raíces reciben una solución nutritiva equilibrada disuelta en agua para el desarrollo de las plantas [1]. El cultivo de raíz flotante (CRF) es una técnica de cultivo en agua en la cual las plantas crecen flotando en una placa de unicel, teniendo siempre su raíz dentro de la solución nutritiva. Un entorno adecuado propicia que el ciclo de la planta disminuya y se obtengan cosechas con buen rendimiento [2]. Algunas de las ventajas de la hidroponía frente al cultivo tradicional son la reducción de costos, la producción de cosechas fuera de temporada, el ahorro de espacio y capital, un increíble ahorro de agua, etc. [3]. Esta técnica es ampliamente aplicada en zonas urbanas. El gobierno de la Ciudad de México está impulsando la creación de huertos urbanos en unidades habitacionales con la intención de producir verduras y hortalizas para el consumo de los habitantes de las mismas unidades [4], por ende estos cultivos requerirán de infraestructura para su mantenimiento y para la buena producción.

Las variables consideradas importantes para mantener un CRF en buenas condiciones son la conductividad eléctrica (CE) y el nivel de pH. La CE es un indicador de la concentración de sales disueltas en el agua [5]. Un valor bajo de la CE indicaría una solución con deficiencia de nutrientes, mientras que un valor alto indicaría que la solución acuosa es tóxica para el CRF. El pH de la solución

acuosa, dentro de un rango específico, indica la disponibilidad de los nutrientes para las plantas [5]. La temperatura es una tercera variable que influye en el desarrollo de la planta y que es necesario medir para obtener valores de CE y pH certeros. Se vislumbra entonces que la monitorización de estas tres variables, por medio de un único sistema electrónico de medición inalámbrica, es una solución viable y útil en entornos CRF.

El uso comercial de pH-ímetros y conductímetros está extendido entre los agricultores que practican la hidroponía, sin embargo, se ha tenido la motivación de contribuir tanto en la optimización de la instrumentación como en la posibilidad de sustituir importaciones. En el país, se pueden encontrar medidores de EC como el modelo EC-3 [6] a un costo de \$1,299.00 MN y el medidor de pH modelo P003317 [7] a un costo de unos \$915.00 MN. La autonomía de estos instrumentos imposibilita la medición simultánea de ambas variables, además no cuentan con capacidad de comunicación a dispositivos personales móviles. El instrumento modelo HI 9813-6 [8] integra ambas funcionalidades, pero a un alto costo (€212) y tampoco puede comunicarse a dispositivos personales móviles.

En las técnicas de medición de pH [9, 10, 11, 12, 13, 14] se utilizan procesadores analógicos frontales (PAF) grado electrómetro para acondicionar la señal de sensores pH de cristal con alambre de Ag/AgCl con una salida del orden de mV con incrementos de 1.16 mV para resoluciones de  $\pm 0.02$  pH y ADC del tipo  $\Sigma$ - $\Delta$  de 16 bits, con incertidumbres de  $\pm 0.01$  pH. Sin embargo, la medición de pH en hidroponía no requiere de tal exactitud, ya que es suficiente con mantener una solución acuosa entre 5.5 y 6.5 pH con una incertidumbre máxima de  $\pm 0.1$  pH que un ADC de aproximaciones sucesivas de 8 bits es capaz de alcanzar. Además, sus capacidades de comunicación son de grado industrial. El mismo comentario aplica para las técnicas CE, aunque hay poca documentación [9]. En cuanto a la sonda CE, la celda más común consiste de 2 electrodos (2-pole) de grafito o platino que se excita por medio de un generador de pulsos bipolares y se hace una medición de la resistencia de la sonda, alterada por la concentración de sales del medio acuoso. Se trata del método convencional [12, 14], aunque aquí se propone una simplificación.

En este trabajo se propone el diseño de un instrumento que mida el pH y la CE de una solución acuosa, utilizada en CRF, de manera simultánea con una instrumentación electrónica de bajo costo, pero que proporcione mediciones certeras y que incluya un enlace inalámbrico para transmitir los datos de las mediciones hacia un dispositivo móvil (“smartphone”) con posibilidad de manejo de avisos de advertencia.

## 2. Desarrollo

*Principio de medición del pH.* Los valores de pH se calculan como el logaritmo negativo de la concentración de iones H en un líquido, a 25 °C. Esta concentración se mide por la diferencia de potencial entre una celda de referencia en contacto con una solución con concentración de iones conocida y una celda de medición en contacto con una solución de concentración de iones desconocida. El voltaje entre las dos celdas satisface la ecuación 1 de Nernst [15].

$$E = E_0 + KT(pH_x - pH_0) \quad (1)$$

El sensor utilizado consiste de un electrodo de vidrio y un electrodo de AgCl. El primero se usa como electrodo indicador, el segundo como electrodo de referencia. La medición del pH por medio de la fuerza electromotriz generada entre estos dos electrodos (celda galvánica) está dada por ecuación 2 [15].

$$V = K(273.15 + t)(pH_x - pH_0) \quad (2)$$

*Principio de medición de la conductividad eléctrica.* La CE es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transmitir una corriente eléctrica y es igual al recíproco de la resistividad de la solución. Depende de la presencia de iones, de su concentración, movilidad y valencia, y de la temperatura ambiental. Se mide en [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] [16]. Una corriente eléctrica alterna (I) se aplica a dos electrodos sumergidos en una solución y se mide el voltaje resultante (V). Entonces, los cationes se mueven hacia el electrodo negativo y los aniones al electrodo positivo: la solución actúa como un conductor eléctrico [16], se deduce la conductividad como  $CE = I/V$ , figura 1. Normalmente, un sensor de conductividad tiene en su

interior dos celdas (“2-pole cell”) con el modelo eléctrico de la figura 2 a), donde  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$  forman la resistencia de las terminales del electrodo,  $R_1$  y  $R_2$  forman la resistencia de polarización o resistencia de Faraday y  $C_P$  es la capacitancia del sensor.

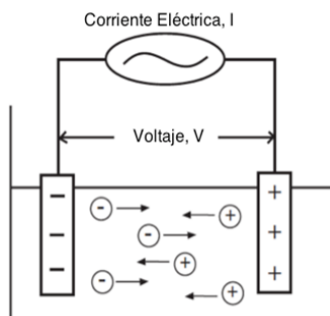


Figura 1 Movimiento de iones en una solución [16].

Un modelo simplificado se muestra en la figura 2 b), donde  $R_x$  y  $C_x$  representan la resistencia y la capacitancia del baño acuoso [17], respectivamente.

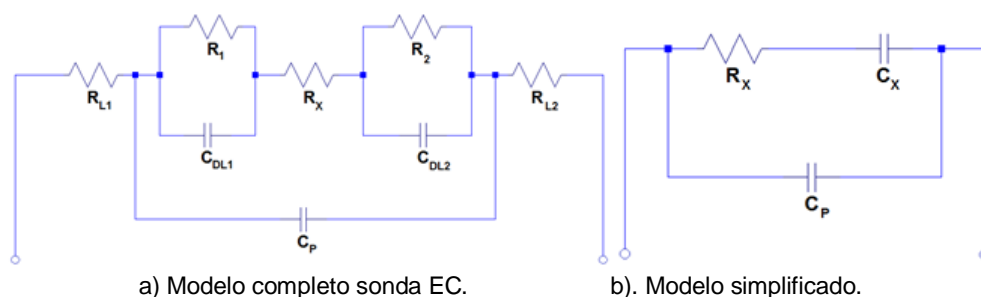


Figura 2 Modelo sonda EC [17].

Un principio de medición, figura 3, consiste en utilizar un oscilador para generar un tren de pulsos como señal de excitación a la sonda CE de manera que, con los cambios de su impedancia, la amplitud de la señal de salida en la sonda varíe. Esta variación reflejará los valores de la CE [17].

En este método, figura 3, disminuye el efecto de  $R_{L1}$  y  $R_{L2}$ , en particular para valores altos de concentración de sales en la solución, y el valor del capacitor  $C_x$ . Si  $R_x C_x \gg T$ , entonces el voltaje en  $C_x$  será pequeño y la corriente en  $C_P$  habrá dejado de circular, ya que el capacitor habrá alcanzado toda su carga. Por tanto se obtiene ecuación 3.



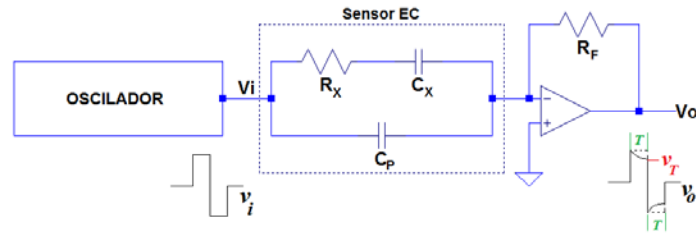


Figura 3 Diagrama del principio de medición de la CE [17].

$$R_X = -\frac{V_T}{V_O} R_F \quad (3)$$

Entonces  $\forall R_X C_X \gg T$ ,  $V_T \neq f(C_X)$ , con lo cual se logra que la sonda CE se comporte como un resistor. El problema de la polarización no se puede soslayar. Se propone enviar una corriente pulsada de periodo  $T \ll R_X C_X$  que cargue/descargue un circuito  $R_X C$  y, por retroalimentación, obtener la frecuencia de pulsación definida por el mismo circuito. Entonces la frecuencia de los pulsos será proporcional a  $R_X$ , luego a la CE. Por otro lado, la medición de frecuencia es más simple de realizar con un microcontrolador. Este concepto se ilustra en la figura 4.

La temperatura de la solución tiene efectos sobre la ionización, la solubilidad, la proporción de la movilidad de los iones, la viscosidad de la solución y su expansión. Las variaciones de las propiedades de la solución debidas a cambios de la temperatura resultarán en una medición inexacta de la CE.

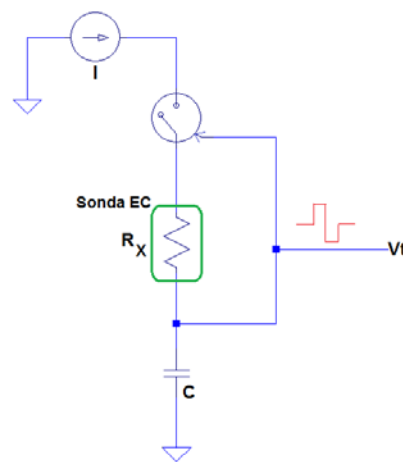


Figura 4 Esquema funcional concepto de la conversión EC a frecuencia.

Cuando la temperatura aumenta, la viscosidad de la solución disminuye y el movimiento de los iones se acelera bajo el campo eléctrico con lo cual la CE varía. Por tanto, se ha de utilizar un método de compensación que reduzca la inexactitud de las mediciones de CE cuando varía la temperatura. Como la temperatura de referencia se ha establecido en 25 °C, la ecuación 4 compensa los efectos de la temperatura en la solución.

$$EC_{25^{\circ}C} = \frac{EC_i}{1 + \left(\frac{\theta}{100}\right) * (T_i - 25^{\circ}C)} \quad (4)$$

Donde  $EC_i$  es la conductividad eléctrica inicial (sin compensar),  $\theta = 1.885 \text{ \%/}^{\circ}C$  es el factor de temperatura para la compensación,  $T_i$  es la temperatura medida en  $^{\circ}C$  y  $EC_{25^{\circ}C}$  es la CE a 25 °C.

*Solución material.* En la figura 5 se muestra el sistema propuesto. El sensor de pH es el modelo S200C [18]. La señal de salida de este sensor es acondicionada por un módulo especializado descrito en detalle más adelante. El sensor de EC es el modelo CS150 [19]. A este sensor se le asociará la solución material correspondiente al método ilustrado en la figura 3.

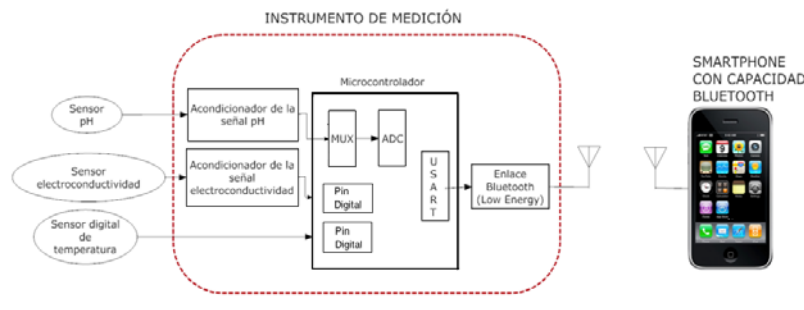


Figura 5 Diagrama a bloques funcional del medidor de pH y CE desarrollado.

La medición de la temperatura es indispensable para realizar la compensación sobre las mediciones del pH y la CE. Se hace con un sensor de temperatura digital modelo DS18B20 [20]. Se trata de un sensor digital que utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire y tiene un rango de medición de - 55 a 125 °C. El microcontrolador es un ATmega328p [21], de 8 bits, con un ADC de 10 bits de

resolución (pH), dos pines digitales para recibir interrupciones externas (CE) y una USART para conectar el módulo Bluetooth Low-Energy [22]. La comunicación inalámbrica entre el instrumento de medición y el “smartphone” será responsabilidad de un módulo Bluetooth, versión 4.0 “Low Energy” que es un radio conveniente para este proyecto, ya que su consumo máximo es de 400  $\mu$ A a 1.5 mA en modo “sleep” y de 8.5 mA en modo activo. La selección de este estándar de comunicación inalámbrica se justifica porque, en general, la tecnología más reciente de un “smartphone” incluye un radio Bluetooth 4.0. El “smartphone” utilizado es un iPhone [23]. Una aplicación con el SDK de ese dispositivo recibirá los datos del pH, de la conductividad eléctrica y de la temperatura, permitiendo así al usuario monitorizar su cultivo hidropónico.

*Diseño del acondicionador de señal del sensor de pH.* De la ecuación (1) se obtiene un cambio de 59.16 mV a 25 °C en el voltaje de salida del sensor para un cambio de 1 unidad de pH en la solución. Por tanto, para una medición en la gama de pH neutro a pH 14 se tendrá un rango de voltaje de salida en el sensor de - 414.12 mV a + 414.12 mV [24]. Esta relación se ha comprobado experimentalmente (figura 6), lo que confirma la relación lineal de la función  $v_o = f(pH)$  en el sensor. Este conocimiento permite diseñar un circuito acondicionador que adapte su variación al rango de 0 a 5 V de entrada al ADC del microcontrolador.

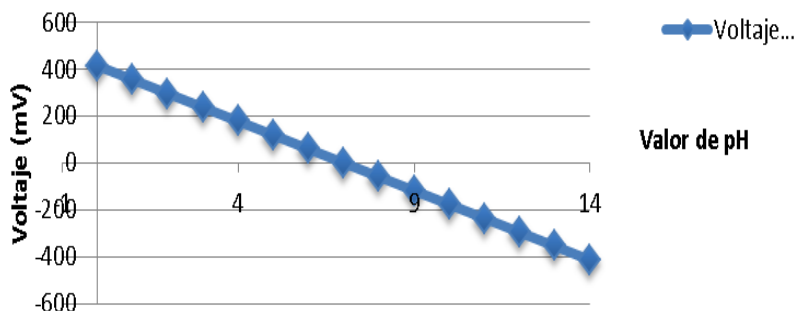


Figura 6 Relación entre el pH y el voltaje entregado por el sensor de pH.

Los principios de transformación que ha de realizar el acondicionador de señal, se ilustran en la figura 7.

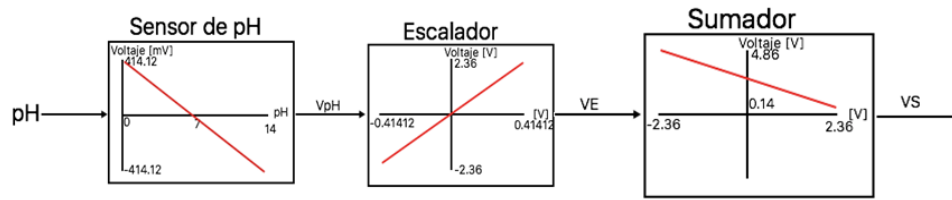


Figura 7 Diagrama a bloques del acondicionador de señal para el sensor de pH.

El modelo matemático deducido de la figura 7 se ilustra en la figura 8, en la cual se han identificado las funciones del circuito. La solución material se ilustra en la figura 9.

$$V_s = 2.5 - 5.7V_{pH}$$

Offset Amplificador diferencial → 2.5  
 Ganancia del amplificador → 5.7  
 Entrada al amplificador →  $V_{pH}$

Figura 8 Ilustración del modelo matemático del acondicionador de señal pH.

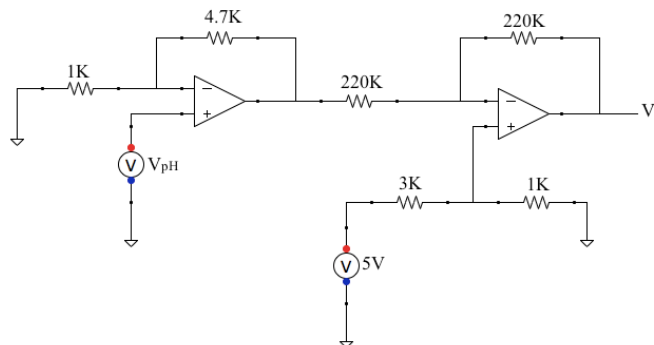


Figura 9 Diagrama eléctrico del acondicionador de señal para el sensor pH.

El amplificador diferencial, figura 9, se ha implementado con un amplificador operacional LMC6041B [25], ya que sus características son las idóneas para este tipo de aplicaciones. Finalmente, el voltaje total a la salida del circuito de acondicionamiento de la señal estará en un rango de 0.14 a 4.86 V, el cual cubre prácticamente el rango de voltajes, a escala completa, del ADC del microcontrolador.

*Diseño del acondicionador de señal del sensor CE.* La materialización del concepto de la figura 4 se presenta en la figura 10, donde el temporizador 555

opera en modo de retroalimentación directa, la patita 3 es el colector abierto de un transistor que aplica pulsos de corriente para cargar/descargar el capacitor C1 a través del resistor R1 en paralelo con la resistencia equivalente  $R_x$  del sensor CE. Este es un método cuasi-digital que no requiere de un procesamiento analógico de la señal, ya que solamente basta con contar el número de pulsos generados por en el ciclo de carga/descarga proporcional al valor de la CE. Este conteo puede ser hecho por medio de interrupciones externas en el sistema digital.

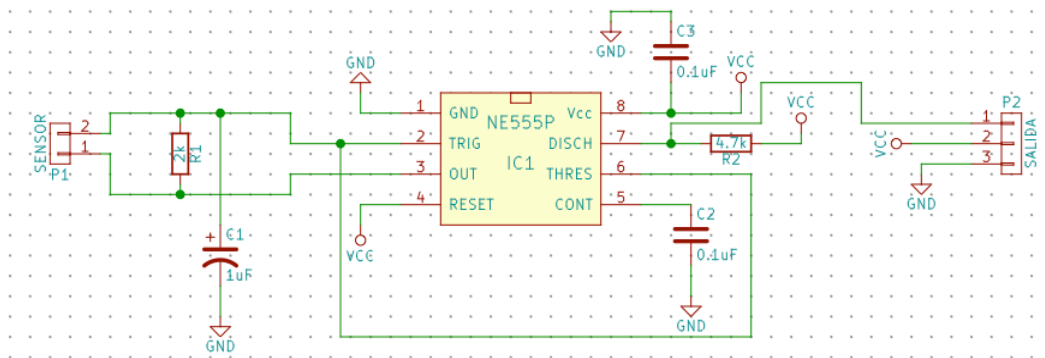


Figura 10 Esquema eléctrico del acondicionamiento de señal proveniente del sensor EC.

*Diseño del circuito de cálculo y control.* En la figura 11 se ilustra el diagrama eléctrico del órgano digital de cálculo y control con los componentes antes descritos. La principal función de esta etapa consiste en ejecutar el algoritmo que permita medir el valor de pH, la CE y hacer la compensación en temperatura para estas variables, además de enviar los valores de éstas a través del módulo Bluetooth 4.0 hacia el “smartphone”.

*Descripción de la programación del microcontrolador.* En la figura 12, se muestra los principales algoritmos de medición

*Programación de la App para iPhone.* La herramienta utilizada para el desarrollo de la aplicación que permitirá la visualización de los niveles de pH, CE y temperatura en la pantalla de un “smartphone”, ha sido el SDK (Software Development Kit) para iPhone. La figura 13 muestra la estructura visual de la aplicación. La aplicación, figura 13, consta básicamente de una lista donde se mostrarán los dispositivos disponibles para ser enlazados, vía Bluetooth, con el

iPhone. De esta manera, el agricultor podrá elegir de entre varios dispositivos de monitoreo en diferentes cultivos, si es el caso.

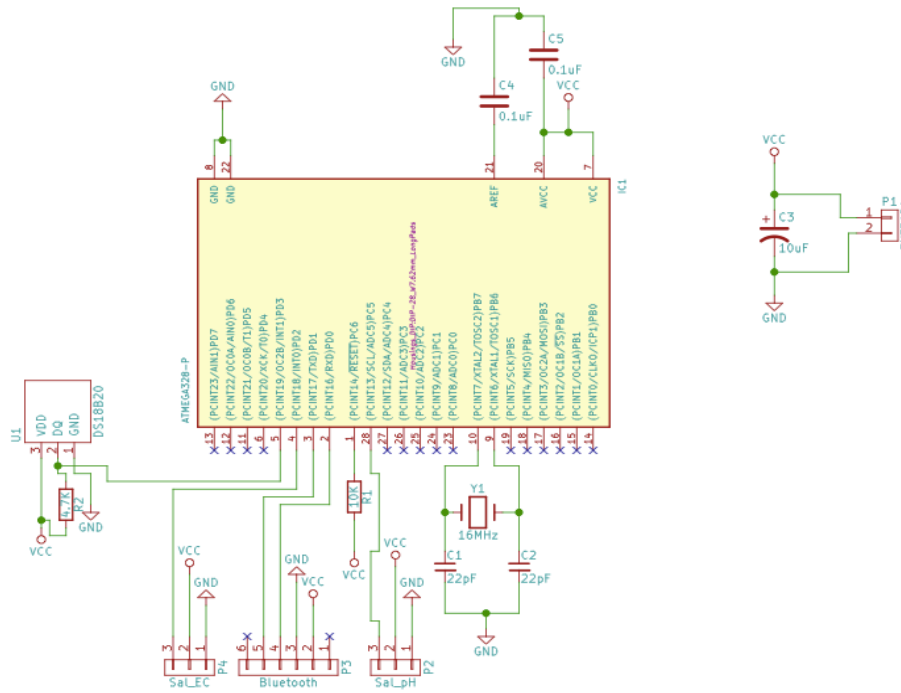


Figura 11 Diagrama eléctrico del circuito digital de cálculo y control.

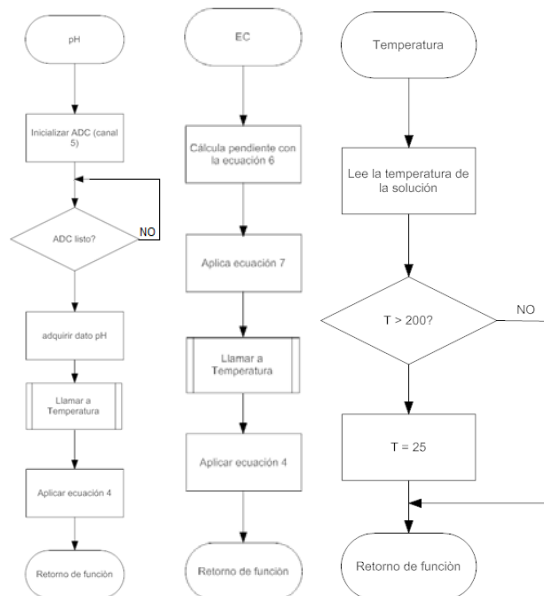


Figura 12 Diagramas de flujo de funciones para medir pH, EC y temperatura de solución.

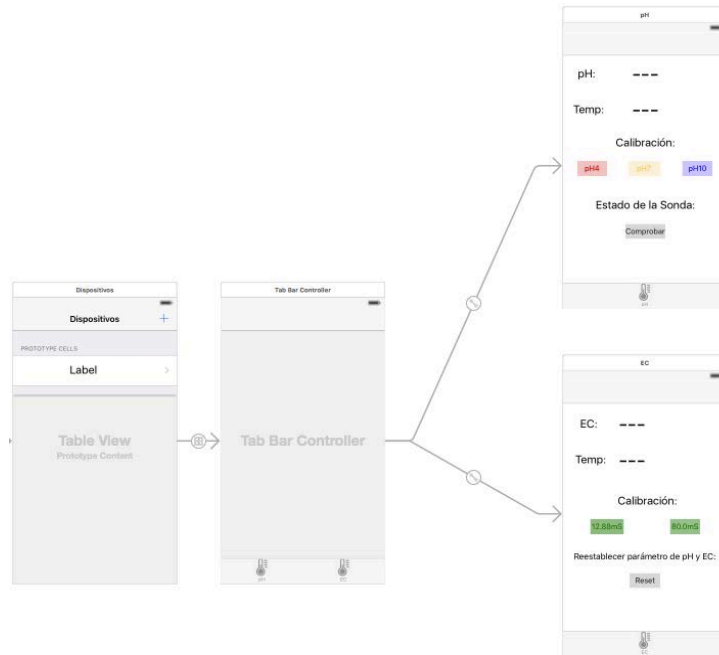


Figura 13 Estructura visual de la aplicación para el “smartphone”.

### 3. Resultados

Simulación y mediciones módulo pH. El diseño del acondicionador de la señal de la sonda pH se ha validado por simulación del circuito. La figura 14 muestra el circuito de la simulación y la figura 15 el resultado.

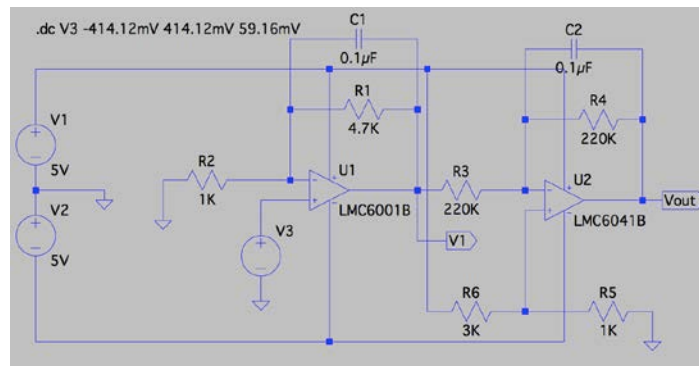


Figura 14 Circuito a simular del acondicionador de señal de la sonda pH.

La figura 16 muestra el montaje experimental para comprobar el módulo del acondicionador de la señal de la sonda pH haciendo uso del chasis SCXI-1000 [26, 27] y la programación G en figura 17.

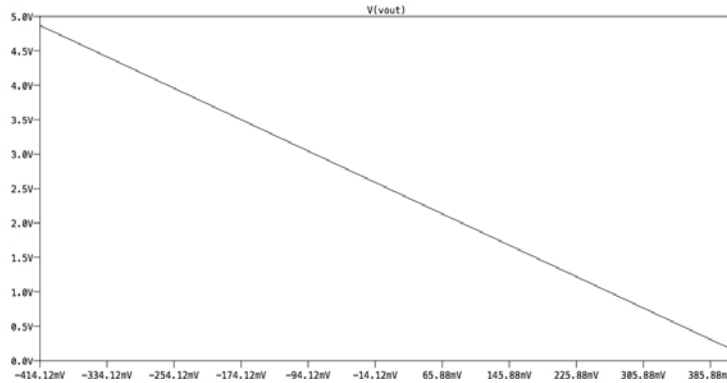


Figura 15 Resultado de la simulación del acondicionador de la señal de la sonda pH.

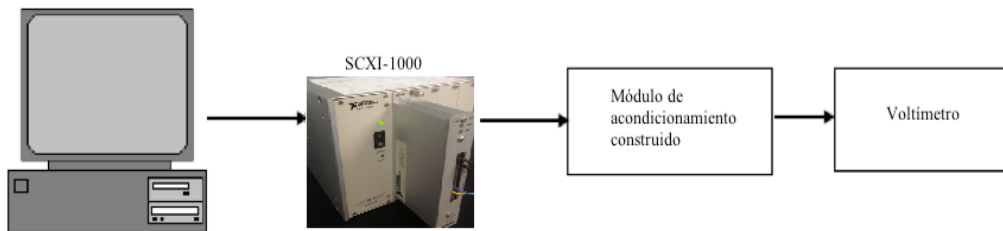


Figura 16 Montaje experimental para probar el módulo pH.

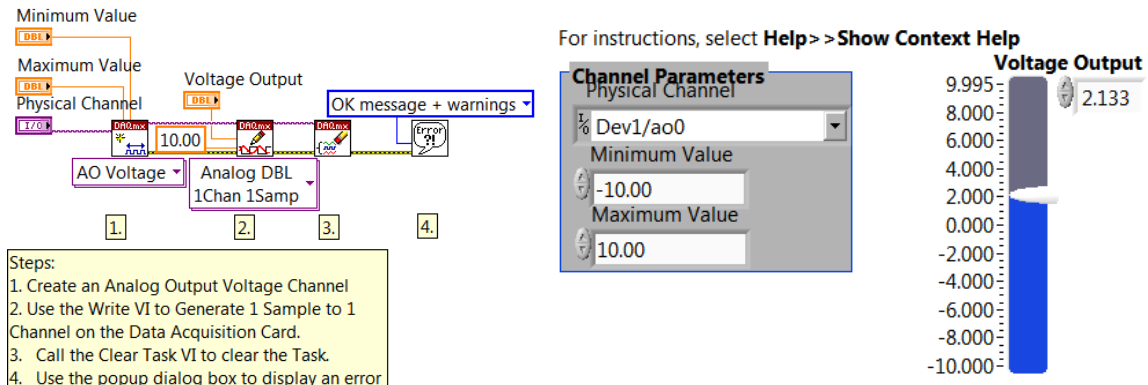


Figura 17 Programa vi para controlar el chasis SCXI-1000 y Panel frontal del mismo.

El registro de voltajes se muestra en la tabla 1. La figura 18 y tabla 2 ilustran las pruebas finales de medición de pH.

*Simulación y mediciones módulo CE.* La simulación del sensor de conductividad ha consistido en obtener el valor de la resistencia equivalente por cada valor de



conductividad eléctrica estándar (buffer de calibración para CE) el cual está dado por la ecuación (5).

Tabla 1 Registro de voltajes.

pH	Voltaje sonda [mV]	V1 (5.7V <sub>pH</sub> ) [V]	V <sub>out</sub> [V]
0	414.12	2.341	0.144
1	354.96	1.993	0.482
2	295.80	1.645	0.825
3	236.64	1.297	1.166
4	177.48	0.950	1.468
5	118.32	0.601	1.815
6	59.16	0.254	2.188
7	0	0	2.510
8	-59.16	-0.259	2.834
9	-118.32	-0.614	3.170
10	-177.48	-1.086	3.510
11	-236.64	-1.329	3.853
12	-295.80	-1.672	4.195
13	-354.96	-2.055	4.567
14	-414.12	-2.301	4.896



Figura 18 Instrumento para medir el pH y Visualización pH.

Tabla 2 Resultados mediciones.

pH Solución Buffer	Temperatura Solución [°C]	pH Solución Buffer Medido	Temperatura Medida [°C]
4.00	20	4.04	20.3
7.03	20	7.04	20.8

Donde  $R$  es la resistencia calculada en  $\Omega$ ,  $Q_{cell}$  es la constante de Bessel de la sonda de conductividad, en este caso 1.0 y  $K$  es el valor de conductividad de la solución buffer. En la tabla 3 se pueden observar los valores de resistencia obtenidos para cada valor de conductividad eléctrica. Con la simulación realizada y comprobado el análisis teórico, la tabla 4 relaciona la frecuencia entregada por el sensor de EC a 25°C. En la figura 19 se han graficado los valores de la conductividad en función de la frecuencia y se observa que el comportamiento es lineal. Los valores de conductividad de 12.88 mS/cm y 80.00 mS/cm son valores de soluciones estándar de calibración indicadas para una sonda de conductividad con  $K = 1.0$ .

Tabla 3 Valores de resistencia obtenidos.

Valor de conductividad [mS/cm]	Valor de resistencia [ $\Omega$ ]
12.88	77.63
80	12.5

Tabla 4 Frecuencia entregada por sensor.

Valor de conductividad [mS]	Valor de resistencia [ $\Omega$ ]	Frecuencia (1/T) [Hz]
12.88	77.63	8510.6
80	12.5	31250

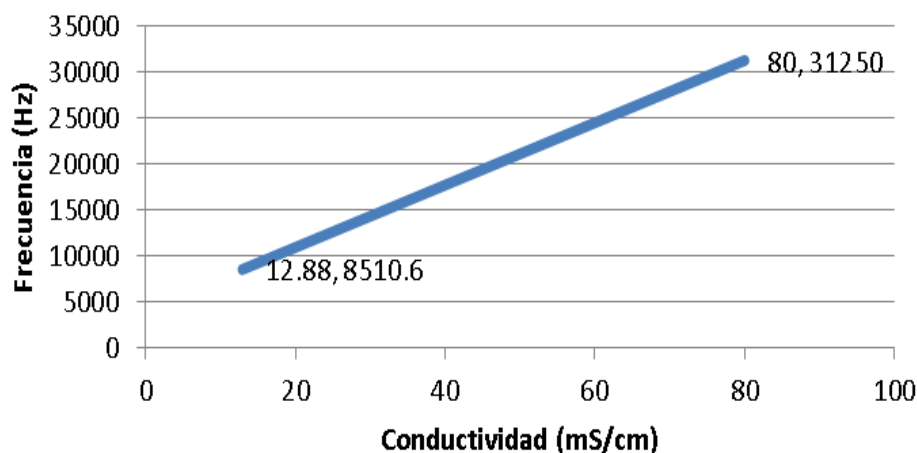


Figura 19 Gráfica que muestra la relación lineal entre frecuencia y conductividad.

El modelo matemático deducido está dado por ecuación 5.

$$frecuencia = 338.78(EC) + 4147.02 = mEC + b \quad (5)$$

A partir de la ecuación (5), se puede generalizar el modelo matemático para calcular el valor de la conductividad eléctrica con base en la frecuencia obtenida para cada valor diferente, ecuación (6).

$$EC = \frac{1}{m} frecuencia + b \quad (6)$$

De esta forma será posible implementar el algoritmo necesario para el cálculo de la conductividad eléctrica en el microcontrolador. La validación del circuito del acondicionador que medirá la conductividad eléctrica, se realizó al utilizar la sonda CE para medir soluciones buffer y observando la frecuencia de salida del módulo en un osciloscopio.

La figura 20 es el resultado de la medición para una solución buffer de 80 mS/cm. La tabla 4 concentra los resultados de la simulación y los resultados experimentales. La figura 21 y tabla 5 ilustran las pruebas finales de la medición EC.

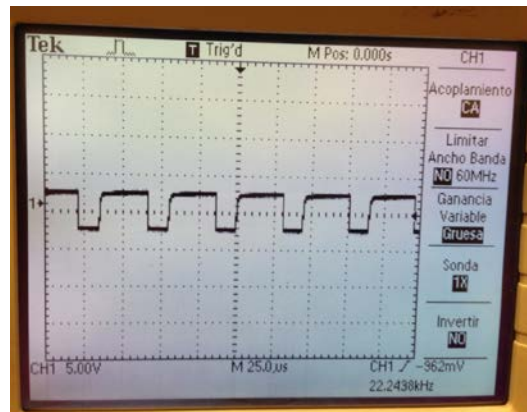


Figura 20 Oscilograma de la respuesta de la sonda para una solución de 80.00 mS/cm.

Tabla 5 Resultados simulación y experimental.

Valor de Conductividad [mS]	Frecuencia (1/T) Hz (simulación)	Frecuencia (1/T) [Hz] (experimental)
12.88	8510.6	4907.01
80	31250	22243.8



Figura 21 Instrumento para medir y visualización lectura EC.

Tabla 5 Mediciones EC

EC Solución Buffer [mS/cm]	Temperatura Solución [°C]	EC Solución Buffer Medido [mS/cm]	Temperatura solución Medida [°C]
11.670	20	11.34	18.3
72.40	20	70.35	18.4

#### 4. Discusión

La comparativa entre los datos en la figura 15 y la tabla 1 muestran diferencias del 0.014, las cuales podrían deberse a que existen interferencias de ruido eléctrico alrededor del laboratorio.

En cuanto a la CE, se observan diferencias significativas entre las frecuencias experimentales y las simuladas en la tabla 5, lo cual es normal, pues en el experimento no se tomó en cuenta la temperatura a la que se encontraban las soluciones “buffer” de calibración. Se puede decir a favor que el experimento sirvió para validar que el circuito genera la señal cuadrada de una frecuencia proporcional al valor CE medido.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que las mediciones efectuadas con el instrumento son mediciones fiables, pues no están muy alejadas de los valores de las soluciones “buffer”, tanto de pH como de CE, preestablecidas por el fabricante. La tabla 6 resume las características del instrumento propuesto. Además, cabe mencionar que los rangos de pH y de CE en un CRF varían de 5.5

a 6.5 para el pH y de 1.5 a 3 mS/cm para la CE [5], con lo cual no es esencial llevar a cabo un proceso de calibración del instrumento antes de utilizarlo en un entorno real ya que, en esos rangos, la planta asimila fácilmente los nutrientes, mantiene disponibilidad de los mismos y los elementos se encuentran solubles [28].

Tabla 6 Características de instrumento propuesto.

<b>Especificación</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Intervalo de pH	5.5 a 6	
Intervalo de Conductividad eléctrica (EC)	1.5 a 3	mS/cm
Temperatura medible	0 a 100, precisión $\pm 0.5$	$^{\circ}\text{C}$
Alcance de Transmisión de datos hacia el Smartphone	100	m

## 5. Conclusiones

El instrumento desarrollado realiza la medición del pH y de la CE dentro del rango óptimo que una solución nutritiva para cultivos hidropónicos ha de presentar. La monitorización de la solución es constante, con lecturas simultáneas del pH y la CE y en tiempo real. Aunque el instrumento no se ha probado aún en un CRF, se tiene la certeza de que podrá medir los rangos de pH y CE deseados dentro del cultivo, ya que las mediciones realizadas con las soluciones “buffer”, son valores que están más allá del rango preestablecido y mencionado con anterioridad.

El instrumento ofrece ventajas sobre productos similares comerciales en cuanto a su costo, posibilidad simultánea de la medición de pH y CE, monitorización a distancia mediante el uso de un dispositivo móvil personal, lo que evita la vigilancia presencial del cultivo, avisos de advertencia al agricultor independientemente de su ubicación, tecnología de bajo consumo y realización del producto a partir de una formación en ingeniería electrónica normal y con componentes del mercado nacional.

En un trabajo futuro, se puede someter al instrumento a un proceso de calibración para validar su rango de medición y el valor de la incertidumbre sobre las mediciones, agregar otras posibilidades de medición, como la de sólidos totales

disueltos, adaptarlo a aplicaciones diversas como medición de las propiedades del agua de lluvia, fertilizantes, agua purificada, etc.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] ¿Qué es la hidroponía? <http://es.wikipedia.org/wiki/Hidropon%C3%ADa>.  
Abril de 2016
- [2] Cultivo en Raíz Flotante. [https://www.cosechandonatural.com.mx/cultivo\\_en\\_raiz\\_flotante\\_articulo37.html](https://www.cosechandonatural.com.mx/cultivo_en_raiz_flotante_articulo37.html). Abril de 2016
- [3] Ventajas de la hidroponía. <http://hidroponia.org.mx/cultivo-hidroponico/ventajas-de-la-hidroponia>. Abril de 2016
- [4] Huertos urbanos en unidades habitacionales en la Ciudad de México. [http://www.prosoc.df.gob.mx/pdf/Boletines\\_PDF/2014/Bol73\\_PROSOC\\_AGRICULTURA.pdf](http://www.prosoc.df.gob.mx/pdf/Boletines_PDF/2014/Bol73_PROSOC_AGRICULTURA.pdf). Abril de 2016
- [5] Variables en el cultivo de raíz flotante, Recuperado el 8 de abril de 2016. [http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=35&chapter=2](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=35&chapter=2).
- [6] EC-3: Electrical Conductivity Tester with Case. <http://www.tdsmeter.com/products/ec3.html>. julio de 2016.
- [7] Medidor de pH digital con pantalla LCD rango 0 a 14 pH. [http://www.dantronics.com.mx/home/110-medidor-de-ph-digital-conpantalla-lcd-rango-0-a-14ph-110.html?search\\_query=medidor+ph&results=4](http://www.dantronics.com.mx/home/110-medidor-de-ph-digital-conpantalla-lcd-rango-0-a-14ph-110.html?search_query=medidor+ph&results=4). Julio de 2016.
- [8] Ficha técnica de HI 9813-5 / HI 9813-6 medidor de pH/Ce/TDS con una sonda y ATC. <http://www.hannainst.com.mx/informacion-y-descargas/item/ficha-tecnica-de-hi-9813-5-hi-9813-6-medidor-de-phcetds-con-una-sonda-y-atc>. Julio de 2016.
- [9] Wireless pH sensor transmitter (DevPack for SensorTag). <http://www.ti.com/lit/ug/tidua47a/tidua47a.pdf>. Julio de 2016.
- [10] LTC6078 pH Probe Amplifier. <http://www.linear.com/solutions/1191>. Julio de 2016.

- [11] ADI Water Analysis Solution for pH Meters and Conductivity Meters. [http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/apm-pdf/adi-water-analysis-solutions\\_en.pdf](http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/apm-pdf/adi-water-analysis-solutions_en.pdf). Julio de 2016.
- [12] Raipure, A. P. Dhande. "Design of Control System for Measurement of pH and EC of Fertilizer Solution". *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. Vol. 4. Issue 4. April 2015.
- [13] H. Tai, Q. Ding, D. Li, Y. Wei. Design of an Intelligent pH Sensor for Aquaculture Industry. CCTA 2010, Part IV, IFIP AICT 347. 2011. Pp. 642–649.
- [14] S. Zhang, J. Hong, S. Ma; Design of Acid Rain Observing Instrument Based on LPC2368. ICTMF. 2011. CCIS 164. Pp. 419–424.
- [15] C. Solé, Instrumentación industrial. 1997. Alfaomega grupo editor. México.
- [16] Conductivity Theory and Practice. [http://www.analytical-chemistry.uoc.gr/files/items/6/618/agwgimometria\\_2.pdf](http://www.analytical-chemistry.uoc.gr/files/items/6/618/agwgimometria_2.pdf). Abril de 2016.
- [17] Design of Intelligent Conductivity Meter Based on MSP430F149. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01061736/document>. Abril de 2016.
- [18] Sensor de pH marca Sensorex, modelo S200C. <http://www.sensorex.com/docs/specs/SpecsLabpH.pdf>. Abril de 2016.
- [19] Sensor de conductividad eléctrica marca Sensorex, modelo CS150. <http://www.sensorex.com/docs/specs/SpecsEpoxyCond.pdf>. Abril de 2016.
- [20] Sensor de temperatura marca Maxim, modelo DS18B20. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. Abril de 2016.
- [21] Microcontrolador de Atmel, modelo ATmega328p. [http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p\\_datasheet\\_complete.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet_complete.pdf). Abril de 2016.
- [22] Bluetooth 4.0 low energy HM-10. [ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM130614001\\_Serial\\_Port\\_BLE\\_Module\\_Master\\_Slave\\_HM10/DS\\_IM130614001\\_Serial\\_Port\\_BLE\\_Module\\_Master\\_Slave\\_HM-10.pdf](ftp://imall.iteadstudio.com/Modules/IM130614001_Serial_Port_BLE_Module_Master_Slave_HM10/DS_IM130614001_Serial_Port_BLE_Module_Master_Slave_HM-10.pdf). Abril de 2016.
- [23] Stephen G. Kochan, Programming in Objective-C. Sixth edition.

- [24] pH sensor. <https://bitknitting.wordpress.com/2014/04/16/a-salad-a-day-4th-post-diy-ph-sensor>. Abril de 2016.
- [25] Amplificador operacional LMC6041B. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmc6041.pdf>. Abril de 2016.
- [26] Chasis SCXI-1000. <http://www.ni.com/pdf/manuals/3744231.pdf>. Abril de 2016.
- [27] Bloque terminal SCXI-1325. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/1682>. Abril de 2016.
- [28] Importancia de la medición del pH en la hidroponía. [http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main\\_page=page&id=34](http://www.hydroenv.com.mx/catalogo/index.php?main_page=page&id=34). Abril de 2016.

## 7. Autores

Ing. Alan Jorge Medina Blancas. Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, desde 2016. Desarrolla principalmente aplicaciones en instrumentación electrónica y procesamiento de señales en combinación con el desarrollo de apps para iPhone e IoT. Actualmente, desarrolla soluciones materiales para diversos proveedores de la industria electrónica.

Dr. Raymundo Barrales Guadarrama. Ingeniero en Electrónica, con especialidad en Sistemas Digitales, por parte de la Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco (1987), Maestro en Ciencias, especialidad Ingeniería Biomédica, por parte de la UAM-Iztapalapa (2003), Especialista Universitario en Ingeniería Electrónica, Intensificación en Sistemas de Instrumentación, por parte de la Universidad Politécnica de Valencia, España (2007) y Doctor en Ingeniería Electrónica por parte de la UPV-España (2016). Director de ventas y socio fundador de la empresa Electrónica Especializada (87-92). Es profesor-investigador de tiempo completo en la UAM-A desde 2001, donde desarrolla trabajos en instrumentación electrónica, procesamiento de señales y sistemas de control en el Área de Investigación en Sensores y Procesamiento de Señales. Ha sido miembro de la Sociedad de Instrumentación y Medición del IEEE y es coautor en 3 patentes.



Ing. Nicolás Reyes Ayala. Es Ingeniero en Electrónica, egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco, con área de concentración en Sistemas Digitales y Computadoras; concluyó los créditos de la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, donde realizó trabajos de microelectrónica en aplicaciones biomédicas. Es académico de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco desde 1990, donde fue Coordinador de la Carrera de Ingeniería Electrónica por 9 años y actualmente es Profesor-Investigador Titular del Área de Investigación en Sensores y Procesamiento de Señales e imparte cursos de nivel superior en temas de Electrónica Analógica e Instrumentación. Ha desarrollado proyectos para la Industria, incluyendo sistemas de control de tránsito vehicular y automatización de procesos. Participó en el proyecto IBERCHIP del que formó parte del equipo de soporte para América Latina.

M. en C. Melitón Ezequiel Rodríguez Rodríguez. Estudió la licenciatura en Ingeniería Física en la Universidad Autónoma Metropolitana—Azcapotzalco en la especialidad de Instrumentación y Equipo y la maestría en Ingeniería Biomédica en la unidad Iztapalapa de la misma Universidad. Ha trabajado en la elaboración de dispositivos de interferencia cuántica superconductores para la obtención de magneto-cardiogramas. Actualmente se desempeña como Profesor en el Departamento de Electrónica de la UAM- Azcapotzalco en donde imparte asignaturas como Análisis de Señales, Procesamiento Digital de Señales, así como Circuitos Eléctricos. Entre sus campos de interés están la instrumentación virtual utilizando LabVIEW así como la caracterización y aplicación de sensores. Es coautor en 3 patentes.

Dr. Víctor Rogelio Barrales Guadarrama. Es Ingeniero Físico por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Maestro y Doctor en Ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Ha trabajado en el depósito de películas delgadas y superconductores. Participa como Profesor- Investigador Titular en el Área en Investigación de Sensores y Procesamiento de Señales del Departamento de Electrónica de la

UAM-A, donde ha desarrollado proyectos tecnológicos de vinculación con la industria y es coautor de 3 patentes.

Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón. Realizó estudios en Ingeniería Física en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en el área de Ingeniería Biomédica en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa y el Doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de Texas en El Paso. Actualmente es Profesor-Investigador en el Área de Sensores y Procesamiento de Señales del Departamento de Electrónica. Es coautor en 3 patentes.

# MEDICIÓN DE ILUMINANCIA EN UNA FUENTE DE FOTOTERAPIA

***Carlos Alberto Luján Ramírez***

Instituto Tecnológico de Mérida  
*clujanitm@gmail.com*

***Eric Iván Flores Solís***

Instituto Tecnológico de Mérida  
*floressoliseric@gmail.com*

***José Ramón Atoche Enseñat***

Instituto Tecnológico de Mérida  
*jratoche@gmail.com*

***Margarita Álvarez Cervera***

Instituto Tecnológico de Mérida  
*malvarez@itmerida.mx*

***Mario Renán Moreno Sabido***

Instituto Tecnológico de Mérida  
*mario@itmerida.mx*

## **Resumen**

Este documento trata acerca de las mediciones de luz realizadas a un dispositivo de fototerapia diseñado en el Instituto Tecnológico de Mérida (ITM). La finalidad del dispositivo es para ser usado como fuente de fototerapia para tratar la ictericia neonatal. Las características del diseño fueron obtenidas de documentos científicos, normas y hojas de datos relacionados con el tema de la Fototerapia en el recién nacido.

Las principales características para el diseño fueron la longitud de onda de la luz emitida, el área iluminada y la Iluminancia (lux) que se refiere a la cantidad de flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área.

Se presentan brevemente las etapas de diseño del prototipo, así como el procedimiento de medición realizado para obtener las características de iluminancia del dispositivo.

**Palabra(s) Clave(s):** Bilirrubina, fototerapia, ictericia, iluminancia.

## **1. Introducción**

La fototerapia se aplica en recién nacidos para tratar la hiperbilirrubinemia, que consiste en acumulación de bilirrubina en la sangre; esto a su vez produce que la piel y los ojos se tornen de un color amarillento lo que se le conoce como ictericia. Esta acumulación de bilirrubina se produce porque el hígado del recién nacido no se encuentra totalmente desarrollado, y por lo tanto aún no tiene la capacidad de filtrar la molécula de la bilirrubina. La hiperbilirrubinemia sino es tratada a tiempo puede causar convulsiones y daño cerebral [1].

La fototerapia consiste en aplicar luz sobre la piel del recién nacido; esta luz debe tener una longitud de onda en el rango de los 450 a 480 nanómetros lo que corresponde a la luz de color azul en el espectro electromagnético. Esta luz produce un efecto de degradación en la molécula de la bilirrubina lo que permite que pueda ser eliminada por el organismo [1] [2].

El objetivo del presente trabajo consiste en obtener las características de Iluminancia (lux) de la luz emitida por la fuente de fototerapia.

## **2. Desarrollo**

### **Características del dispositivo de fototerapia**

El dispositivo utiliza diodos emisores de luz (LEDs) como fuente de luz, específicamente el modelo 510LB7C el cual es un tipo de led de color azul súper luminoso con un pico de intensidad luminosa en 465 nm [3]. Se diseñó un panel que consta de 192 leds divididos en grupos de 48 leds; cada grupo es controlado por un circuito TLC5940NT, el cual consiste en un driver de 16 canales con una capacidad de hasta 120 mA por canal; el control se realiza mediante comunicación serial con un microcontrolador [4]. El circuito driver cuenta con un potenciómetro para cada circuito TLC5940NT; este potenciómetro va conectado a la terminal Iref

y permite ajustar la corriente máxima de cada canal en 20 mA, asegurando que esta sea la corriente que circule por cada led. El microcontrolador que se utiliza es el Arduino UNO, el cual cuenta con una librería para el control del TLC5940NT; esta librería permite ajustar el número de circuitos TLC5940NT que se conectan en serie [5]; en este caso se conectan 4 en serie para un total de 64 canales, y a su vez cada canal consta de 3 leds en serie (figura 1).

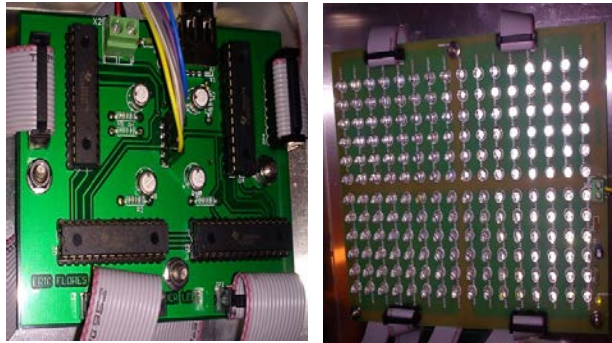


Figura 1 Circuitos driver y panel de leds.

La interfaz entre el atmega328P-PU y el circuito driver consiste en un bus de 5 terminales (figura 2), todas van conectadas en paralelo con cada circuito TLC5940NT con excepción de la terminal SIN que va conectada al primer TLC5940NT, y la terminal SOUT de este va conectada a la terminal SIN del segundo, y así sucesivamente.

Pin 3 Arduino ----- Pin 18 TLC5940 (GSCLK)  
Pin 9 Arduino ----- Pin 24 TLC5940 (XLAT)  
Pin 10 Arduino ----- Pin 23 TLC5940 (BLANK)  
Pin 11 Arduino ----- Pin 26 TLC5940 (SIN)  
Pin 13 Arduino ----- Pin 25 TLC5940 (SCLK)

Figura 2 Interfaz Arduino – Driver.

El control de la intensidad de los leds se realiza mediante un panel de botones pulsadores (push buttons), permitiendo seleccionar 3 niveles de intensidad. El dispositivo utiliza una fuente de 5 V y 12 V para su funcionamiento, siendo 12 V el

voltaje para el panel de LEDs, y 5 V para los demás circuitos. Finalmente, los componentes del dispositivo fueron montados en un chasis de aluminio para las pruebas de funcionamiento (figura 3).



Figura 3 Ensamblado y pruebas de funcionamiento.

### **Configuración para las mediciones**

Para realizar las mediciones se colocó la lámpara sobre una base de madera que permite ubicarla a 30 cm y 45 cm de altura; en la superficie de medición se dibujó un plano X/Y con cuadros de 2.5 x 2.5 cm; las dimensiones del plano son 47.5 x 30 cm. Esta configuración está basada en el método de Vreman [6], que sugiere medir la distribución de irradiancia sobre toda el área iluminada; para esto se realiza una medición cada 2.5 cm a lo largo y ancho de la superficie.

Para este trabajo se midió la iluminancia (lux) utilizando un fotómetro de la marca LUTRON modelo LM-8010. Este dispositivo puede tomar lecturas en el rango de 0–20000 lux y de 0–2000 Ft-cd. Las mediciones se tomaron de manera que el detector (circulo blanco) quedara en el centro de cada uno de los cuadros del plano X/Y.

### **Área Iluminada**

Un aspecto muy importante de la lámpara es el área que es capaz de iluminar, ya que mientras más superficie de la piel del bebe sea iluminada mayor será la eficacia de la fototerapia [1] [6] [7] [8].

Se realizaron mediciones de la superficie iluminada con la lámpara a su máxima intensidad, considerando como superficie iluminada hasta un 70% del valor de la iluminación central. El resultado fue de 926.25 cm<sup>2</sup> a 30 cm y de 1125 cm<sup>2</sup> a 45 cm.

### Iluminancia y potencia de la lámpara

En el siguiente paso se midieron la potencia consumida por la lámpara en sus 3 niveles de intensidad y la iluminancia colocando el detector en el centro del área iluminada (figura 4).



Figura 4 Medición de Iluminancia.

### 3. Resultados

En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos de las mediciones:

Tabla 1 Iluminancia y potencia de la lámpara de fototerapia.

Nivel de Intensidad	Iluminancia (lux) a 30 cm	Iluminancia (lux) a 45 cm	Potencia (Watts)
Apagado	0	0	0.504
Bajo	618	498	5.565
Medio	1290	1017	10.739
Alto	1993	1579	15.909

Los datos de la tabla 1 se pueden ver representados en la figura 5 para una altura de 30 cm, y en la figura 6 para una altura de 45 cm de la superficie.

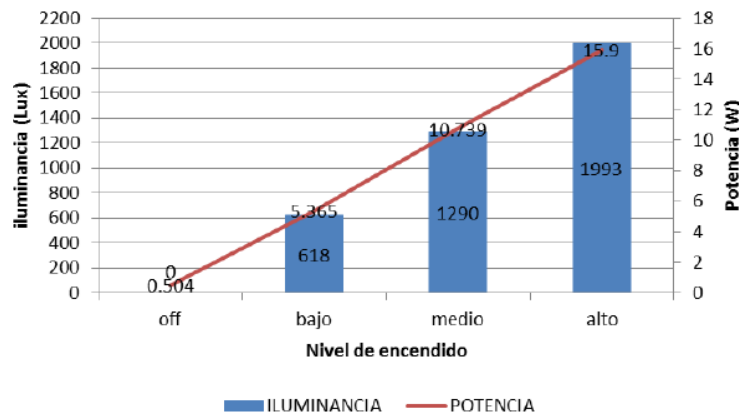


Figura 5 Iluminancia a una altura de 30 cm y potencia.

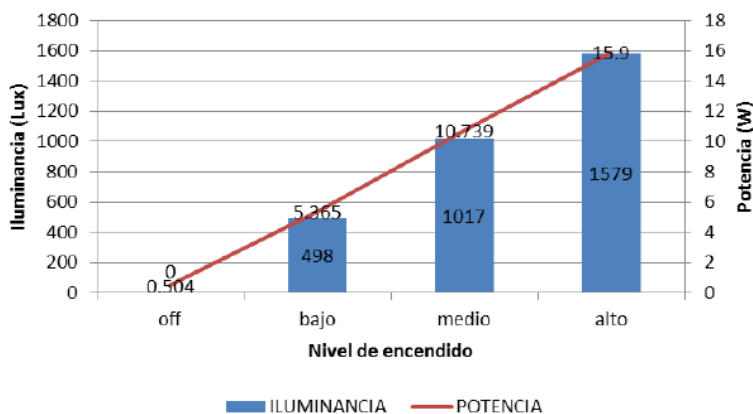


Figura 6 Iluminancia a una altura de 45 cm y potencia.

### Distribución de la Iluminancia

Para obtener la distribución de la iluminancia se realizaron mediciones partiendo del centro del área iluminada y en incrementos de 5 cm hasta llegar a 25 cm de cada lado, este procedimiento se hizo con los 3 niveles de intensidad de la lámpara.

Los datos obtenidos se muestran en figuras 7 y 8 para 30 cm y 45 cm respectivamente; se puede observar que a 30 cm se tiene un valor pico más alto de iluminancia con respecto a 45 cm, sin embargo se puede ver que a 45 cm se tienen valores de iluminancia más altos conforme se aleja el detector del centro, lo que significa que se ilumina mayor área.

Este resultado es interesante porque la intensidad de la luz determina la dosis de la fototerapia, pero también se tiene el compromiso de iluminar la mayor parte de



la piel del bebé. De ahí se observa que para este tipo de lámparas de fototerapia los fabricantes sugieren distancias entre 30 y 45 cm [6].

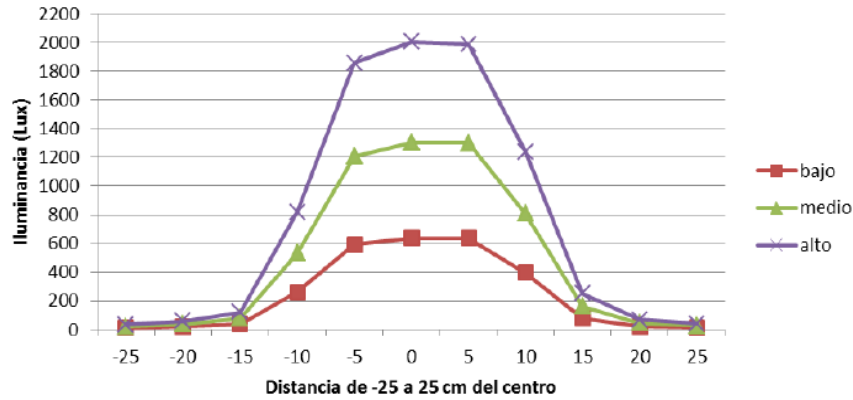


Figura 7 Distribución de Iluminancia a una altura de 30 cm.

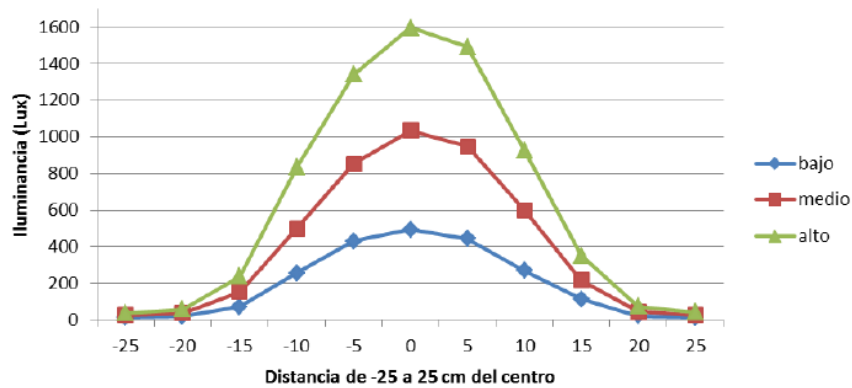


Figura 8 Distribución de Iluminancia a una altura de 45 cm.

### Mapas de iluminancia

Los mapas de iluminancia dan un panorama general de la distribución de la intensidad de luz sobre el área de iluminación.

Para obtener los mapas de iluminancia de la lámpara se realizaron mediciones en toda la superficie del plano X/Y con los tres niveles de intensidad y con ambas alturas. En las tablas 2 y 3 se muestran los datos obtenidos con la lámpara a su máxima intensidad, y a una altura de 30 cm y 45 cm respectivamente; los cuadros en gris representan la silueta de un bebé a término según el método de Vreman [6].

Tabla 2 Mapa de iluminancia a 30 cm con intensidad alta.

	Distancia 30 cm			Intensidad Alta						Unidades Lux										
	X pos																			
Y pos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	33	42	50	58	68	77	86	89	91	93	91	87	83	77	72	60	53	45	39	
2	36	45	55	67	83	111	133	161	148	156	147	140	130	110	89	71	61	51	43	
3	40	51	61	80	130	233	338	389	414	432	402	386	347	244	142	87	68	59	48	
4	43	56	69	93	193	519	794	990	989	1137	967	1033	899	605	294	126	80	64	52	
5	47	59	74	109	265	755	1284	1539	1761	1767	1715	1730	1494	979	559	202	94	69	61	
6	49	63	81	127	299	762	1418	1797	1949	1989	1941	1927	1684	1168	661	228	104	75	62	
7	49	63	81	118	323	775	1401	1853	1934	2022	2023	2021	1815	1298	731	249	108	79	64	
8	48	60	79	109	280	670	1186	1804	1915	1924	1932	1987	1771	1297	751	244	112	76	60	
9	42	57	72	96	200	517	913	1363	1527	1450	1500	1516	1493	1066	589	207	103	75	58	
10	42	51	64	80	130	240	486	740	830	776	783	797	760	657	366	144	93	69	58	
11	38	46	57	71	90	134	193	281	299	301	285	295	321	258	160	102	79	62	52	
12	35	42	51	62	75	88	101	115	121	131	124	126	126	117	95	81	71	59	47	

Tabla 3 Mapa de iluminancia a 45 cm con intensidad alta.

	Distancia 45 cm			Intensidad Alta						Unidades Lux										
	X pos																			
Y pos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	35	41	45	53	71	89	102	123	122	124	131	119	107	83	69	54	45	40	36	
2	37	45	55	73	107	170	226	287	310	303	312	275	231	177	120	75	54	46	40	
3	42	50	66	102	191	320	426	576	630	627	596	555	441	319	196	117	73	50	43	
4	44	54	79	143	301	511	713	905	1056	1015	1024	926	764	532	323	190	94	58	47	
5	47	58	90	176	388	712	952	1230	1391	1369	1375	1241	1052	731	493	273	125	65	51	
6	48	60	91	211	438	797	1073	1357	1543	1585	1585	1429	1214	868	601	340	152	77	54	
7	47	61	94	217	446	764	1077	1370	1549	1636	1631	1524	1276	955	658	367	174	75	53	
8	46	58	87	199	380	680	970	1272	1460	1535	1545	1457	1233	951	651	357	152	73	55	
9	43	54	76	146	291	509	761	988	1159	1236	1239	1170	1029	856	576	292	135	66	52	
10	42	48	60	106	190	326	467	679	805	834	798	804	751	585	409	194	104	58	49	
11	36	44	51	71	116	207	264	377	432	440	439	437	428	346	230	123	77	53	45	
12	35	40	43	56	75	109	136	167	189	189	206	202	201	172	123	80	58	48	41	

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño realizado en el ITM de una lámpara de fototerapia para tratar la ictericia neonatal. Estos dispositivos son de gran

importancia en el área de cuidados intensivos para neonatos en los hospitales, sin embargo no siempre se cuenta con dichos dispositivos debido al costo que llegan a tener los modelos comerciales, por lo que este prototipo podría ser una opción viable para estos casos.

Se han realizado mediciones de la fuente de luz basándose en un método estandarizado para la evaluación de equipos de fototerapia, presentándose resultados en forma de gráficas y tablas.

La mayoría de los dispositivos de fototerapia expresan la dosis de luz en unidades de Irradiancia ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ ); por esta razón sería de gran utilidad para la caracterización de la fuente de fototerapia el obtener los mapas en unidades de irradiancia; para esto se requiere un radiómetro como el Biliblanket meter II de GE [9]; este es el dispositivo utilizado por Vreman y otros autores [6] [8] [10] [11].

Otro punto importante sería considerar hacer pruebas in vitro para determinar el tiempo de exposición necesario para degradar la concentración de bilirrubina en un 50% ( $t_{1/2}$ ) [6] [8]. Vreman sugiere realizar pruebas donde se expongan a la luz de la fototerapia tubos capilares con una solución de bilirrubina a una temperatura controlada de 37 °C; posteriormente se van tomando mediciones en la concentración de las soluciones cada cierto periodo de tiempo hasta que el 60% de la bilirrubina haya sido degradada.

Por último, sería importante considerar el diseño de un lente óptico que permitiera que la iluminancia/irradiancia de la lámpara sea uniforme, es decir, que en todos los puntos del área iluminada se tenga el mismo valor de intensidad. Esto permitiría que la intensidad promedio sobre toda el área iluminada se incrementara, logrando un tratamiento más eficaz.

Un ejemplo de lente óptico que se podría implementar es el “fly-eye lens” que consiste en un arreglo en 2 dimensiones de elementos ópticos individuales, ensamblados de manera que formen un único elemento óptico. Este lente permite transformar la distribución de la luz y pasar de una distribución no uniforme a una distribución uniforme de irradiancia en un plano iluminado [12].

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] H. J. Vreman, R. J. Wong, D. K. Stevenson, *Phototherapy: Current Methods and Future Directions*, Semin perinatol 28. ELSEVIER. 2004. Pp. 326-333.
- [2] NeoBLUE LED Phototherapy, Natus Medical Inc. *The Science Behind the Light*. 2013.
- [3] HB, 510LB7C super bright blue 5 mm led.
- [4] Texas Instruments, TLC5940 16 channel led driver with dot correction and grayscale pwm control. 2007.
- [5] Arduino TLC5940 library. <http://playground.arduino.cc/Learning/TLC5940#.Uz2NjPI5Ne>-. Junio de 2016.
- [6] H. J. Vreman, R. J. Wong, J. R. Murdock, D. K. Stevenson, "Standardized bench method for evaluating the efficacy of phototherapy devices". *Acta Pediatr*. Vol. 97. No. 3. 2008. Pp. 308-316.
- [7] Guía Tecnológica No. 3. Unidad de Fototerapia GMDN 35239. 2012.
- [8] H. J. Vreman, "Phototherapy: The Challenge to Accurately Measure Irradiance". *Indian Pediatrics*. Vol. 47. February 17, 2010. Pp. 127-128.
- [9] GE Healthcare, *Phototherapy, Biliblanket Light Meter II*. 2014.
- [10] R. Malkin, V. Anand, "A Novel Phototherapy Device". *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. March/April 2010. Pp. 37-43.
- [11] V. K. Bhutani, R. J. Wong, "Neonatal phototherapy: choice of device and outcome". *Foundation Acta Pediátrica*. Vol. 101. 2012. Pp. 441-443.
- [12] X. Yang, J. Zhu, R. Li, *Research on the Optical System of Neonatal Jaundice Phototherapy Apparatus based on Fly-eye Lens*. 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA). 2013. pp. 545-547.

## 7. Autores

Carlos Alberto Luján Ramírez es profesor de Tiempo Completo del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Mérida. Sus trabajos de investigación están enfocados a las áreas de Diseño de Sistemas Digitales y

Procesamiento de Imágenes. Obtuvo el grado de Doctor en Diseño de Sistemas Digitales en la universidad Politécnica de Valencia.

Eric Iván Flores Solís obtuvo su grado de Maestro en Ingeniería con especialidad en Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Mérida en el área de Diseño de Sistemas Digitales y Optoelectrónica.

José Ramón Atoche Enseñat es profesor de Tiempo Completo del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Mérida. Sus trabajos de investigación están enfocados a las áreas de Diseño de Sistemas Digitales y Procesamiento de Imágenes. Obtuvo el grado de Doctor en Diseño de Sistemas Digitales en la universidad Politécnica de Valencia.

Margarita Álvarez Cervera es profesora de Tiempo Completo del Departamento de Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Mérida. Sus trabajos de investigación están enfocados a las áreas de Diseño de Sistemas Digitales e Ingeniería Biomédica. Obtuvo el grado de Maestra en Tecnología Educativa en la Universidad Da Vinci en Monterrey, y especialidad en Diseños de Sistemas Digitales en la Universidad Politécnica de Valencia.

Mario Renán Moreno Sabido es profesor de Tiempo Completo del Departamento de Sistemas y Computación en el Instituto Tecnológico de Mérida. Sus trabajos de investigación están enfocados a las áreas de Calidad del Software y de Ambientes de Aprendizaje. Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias Computacionales en la Universidad de las Américas Puebla.

# **SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO DE BAJO COSTO PARA MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EMPLEANDO RASPBERRY PI**

***Oscar May Tzuc***

Instituto Tecnológico Superior Progreso  
*omay@itsprogreso.edu.mx*

***Juliana González Quijano***

Instituto Tecnológico Superior Progreso  
*jgonzalez@itsprogreso.edu.mx*

***José Daniel Ortiz López***

Instituto Tecnológico Superior Progreso  
*danielortizlopez9@gmail.com*

***Renán Quijano Cetina***

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán  
*rquijano@uady.mx*

## **Resumen**

El presente trabajo muestra el desarrollo de una red de monitoreo para sistemas fotovoltaicos basado en el uso de la tecnología inalámbrica ZigBee, microprocesadores ARM de 32 bits y una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi. El sistema propuesto se encuentra formada por un módulo de sensado diseñados para la medición y transmisión de los parámetros de temperatura, voltaje y corriente de los paneles o arreglos fotovoltaicos. Dicho módulo se comunica con una tarjeta Raspberry Pi la cual realiza las funciones de sistema de coordinación central y servidor web. Así, el módulo ZigBee incorporado a la red es capaz de transmitir los parámetros a la tarjeta Raspberry Pi, la cual generará una base de datos con los valores recibidos, además de asignarles fecha y hora. Todos los

datos registrados pueden ser visualizados desde una aplicación web desarrollada, la cual se actualiza constantemente, mediante cualquier computadora o dispositivo móvil.

**Palabra(s) Clave(s):** PSoC, Raspberry Pi, red inalámbrica de sensores, sistemas embebidos, tecnología ZigBee.

## **1. Introducción**

En la actualidad casi la totalidad de la energía consumida a nivel mundial proviene de la quema de combustible fósiles provocando la liberación de una gran cantidad de gases de efecto invernadero a la atmosfera. Esto aunado a la creciente necesidad de energía producto del constante incremento poblacional ha ocasionado que las tendencias energéticas a nivel mundial, hoy en día se enfoquen en la sustitución de las fuentes energéticas convencionales por alternativas sustentables [1,2].

De las diversas fuentes de energía renovables existentes, la energía solar es una de las más prometedoras a futuro debido a que es abundante, limpia, no genera ruido o alguna otra clase de contaminación en el ambiente [3]. Esto en conjunto con la constante reducción de los costos de producción en las celdas fotovoltaicas ha incentivado a los gobiernos de diversos países a la realización de políticas energéticas destinadas al incremento de consumo de sistemas fotovoltaicos tanto a nivel comercial, residencial e industrial [4,5].

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos se ve seriamente afectada por el bloqueo de la radiación incidente sobre el panel, acumulación de suciedad sobre su superficie protectora así como por la acción de agentes degradantes del entorno [5]. Debido a esto monitoreo es considera un aspecto de vital importancia. Mediante él es posible llevar a cabo la observación de la estabilidad y desempeño del sistema proporcionando información que posibilite tomar medidas para optimizar el proceso de generación de energía [4]. Uno de los métodos más simple consiste en realizar la recolección de información y transferirla para su análisis a través de cables. Sin embargo, debido a los costos y limitaciones técnicas de la transmisión por cables, las estaciones de monitoreo requieren estar

razonablemente cerca de las plantas, lo cual trae consigo un incremento en el capital de inversión y costos de mantenimiento. Por lo tanto, para contrarrestar estos inconvenientes los sistemas de monitoreo basados en las tecnologías inalámbricas se han vislumbrado como una alternativa completamente viable para este tipo de aplicaciones bajo intemperie.

En la actualidad los sistemas de monitoreo existentes están asociados a inversores de algún fabricante en particular, son costosos y en la mayoría de los casos dependen de software exclusivo para obtener los datos desde una computadora. Por tal motivo en el presente trabajo se propone un sistema de monitoreo de bajo costo, que sea capaz de conectarse a diferentes sistemas fotovoltaicos independientemente del fabricante del inversor y los paneles. Además, este sistema puede operar de manera autónoma sin la necesidad de una computadora o software específico. Los datos serán accesibles para el usuario a través de una página web a la cual puede accederse desde cualquier computadora o dispositivo móvil con conexión a internet. La sección 2 del documento presenta las características de la tarjeta embebida empleada para el desarrollo del sistema de monitoreo. En la sección 3 se realiza una descripción de tecnología de comunicación inalámbrica empleada. En la sección 4 se describe la estructura de la red implementada. La sección 5 ofrece una descripción detallada de los componentes electrónicos del sistema. Luego, en la sección 6 se presenta algunos resultados de las mediciones experimentales realizadas. Finalmente, la sección 7 contiene las conclusiones del trabajo desarrollado.

## **2. Desarrollo**

### **2.1 Sistemas Embebidos**

Los sistemas embebidos son una combinación de hardware y software de computadoras y en algunas ocasiones piezas mecánicas u otras adicionales diseñados para realizar alguna función específica. Su principal característica es que al estar insertados dentro de un dispositivo que controlan están sujetos a cumplir requisitos de tamaño, fiabilidad, consumo y costo. La gran aplicabilidad de



estos sistemas en cualquier ámbito ha generado gran interés en la industria para su desarrollo [6].

### **Tarjeta de Desarrollo Raspberry Pi**

La tarjeta Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida o SBC de bajo costo, el cual opera bajo el sistema operativo Linux. En la actualidad ha adquirida una gran popularidad debido a su versatilidad de implementación en diversos proyectos como desarrollo de equipos media center, empleo micro controlador avanzado y la habilitación como servidores web, por citar algunos [7,8]. El modelo utilizado en este trabajo es el conocido como Raspberry Pi-B (figura 1).

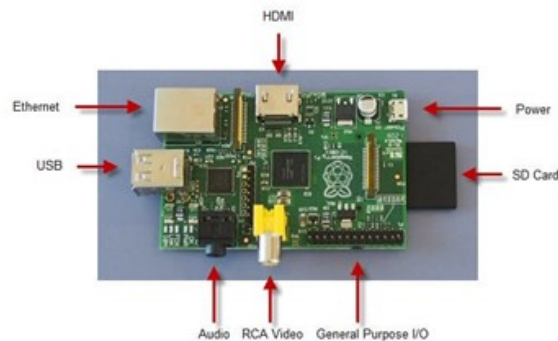


Figura 1 Tarjeta de desarrollo Raspberry Pi modelo B.

### **2.2 Dispositivos ZigBee**

ZigBee es una tecnología de comunicación inalámbrica de bajo consumo y baja tasa de transferencia de datos, basada en las especificaciones del estándar IEEE 802.15.4, empleada para procesos de monitoreo y control de edificios [10,11]. Estos dispositivos poseen un rango de transmisión entre los 70 y 300 metros usando espectros de frecuencia en banda libre entre los 900 MHz y 2.4 GHz. Su estructura de red tiene atributos de Maestro/Esclavo y puede proporcionar funciones de comunicación en dos vías. Los ZigBee emplean niveles MAC mediante los cuales entablan su comunicación con mecanismos de prevención de errores incrementando la confiabilidad de la transmisión de datos [12].

Los dispositivos ZigBee presentan ciertas ventajas sobre otras tecnologías de comunicación inalámbrica enfocadas a la creación de redes de área y redes

personales. La tabla 1 muestra una comparativa de los puntos más relevantes entre las tecnologías ZigBee, Wi-Fi y bluetooth.

Tabla 1 Comparación entre diversas tecnologías inalámbricas [12].

Requerimiento	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Fuente de alimentación	Horas	Días	Años
Orden de complejidad de desarrollo	Muy complejo	Complejo	Simple
Número máximo de nodos	32	7	65536
Velocidad de segmento establecido	3 sec	10 sec	30 msec
Rango de transmisión	100m	10m	70m-300m
Transmisibilidad	11 Mbps	1 Mbps	250 Kbps
Seguridad	SSID	64 ó 128 bits	128 bits AES

La figura 2 muestra los módulos mediante los cuales se distribuye comercialmente la tecnología ZigBee conocidos como dispositivos XBee, El modelo de dispositivo empleado para el presente trabajo fue el XBee Pro S2.



Figura 2 Módulo comercial de comunicación inalámbrica XBee.

### 2.3 Red Inalámbrica de Sensores

Las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés) comenzaron a desarrollarse a finales de los años 90's y para principios de la década de los 2000 se pusieron en marcha las primeras WSN funcionales. Las características de este tipo de redes, además de la transmisión de datos por medios no cableados, son: el bajo consumo energético, la velocidad de transmisión de datos de baja velocidad, la autonomía de la red y una topología dinámica, entre otras [13]. Para formar una WSN es necesario integrar diferentes componentes electrónicos que se enlacen a través de nodos especializados de

acuerdo con la función que se desea que desempeñen. Así, en una WSN típica es posible encontrar los denominados Nodos sensores, Nodos ruteadores, Nodos efectores y Nodos coordinadores. Algunos de estos nodos tienen la posibilidad de combinarse en un solo nodo que desempeñe más de una función. En la estructura del trabajo que aquí se presenta, se implementan nodos sensores, que operan en modo ruteador, así como un nodo coordinador que además funciona como puerto de enlace a Internet.

### **Nodo Sensor**

Un nodo sensor está formado generalmente por uno o más sensores, un micro controlador, un módulo para la transmisión inalámbrica de las variables medidas y una fuente de alimentación [14]. Para optimizar el consumo de energía de los nodos sensores debe seleccionarse cuidadosamente cada uno de sus componentes y optimizar el código de programación del microcontrolador, con el propósito de mantener el dispositivo en modo de reposo durante los periodos que no transmite información [15].

Para el desarrollo del presente proyecto se seleccionó el Sistema en Chip Programable (PSoC, por sus siglas en inglés) CY8C4125AXI-483 de la compañía Cypress Semiconductors, el cual contiene un microcontrolador de última generación con características de bajo consumo energético y que integra módulos analógicos y digitales en un solo encapsulado. Por otra parte, el módulo para la transmisión inalámbrica de los datos obtenidos por los sensores utiliza la tecnología ZigBee.

### **Nodo Coordinador**

El nodo coordinador administra la red solicitando a cada uno de los nodos sensores los datos medidos. Una vez que recibe los datos, los organiza, les asigna la fecha y hora en que fueron recibidos y los almacena en una base de datos para su visualización en la página web. El nodo coordinador ha sido implementado en una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, con capacidad de conexión a internet.

## **2.4 Diseño de la Red Inalámbrica de Sensores**

La red inalámbrica desarrollada está conformada por tres elementos esenciales que operan de manera coordinada los cuales son el módulo sensor, el servidor web y el módulo de transmisión inalámbrica: (a) El módulo sensor se encuentra conformado por tres sensores diseñados para el sensado de las variables de temperatura (T), corriente (I) y voltaje (V) correspondientes a un arreglo o panel fotovoltaico; (b) Una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, funge como servidor web recabando la información medida por los módulos sensores para posteriormente procesarla, estructurar y cargarla a red para su visualización mediante una página web; (c) Módulos de comunicación inalámbricos los cuales emplean la tecnología ZigBee se encuentran conectados tanto a los módulos sensores, como al servidor web. Es a través de estos tres elementos que se establece la conexión inalámbrica a distancia para el monitoreo de los sistemas fotovoltaicos.

La red desarrollada presenta una configuración "Punto-Multipunto" permitiendo la comunicación de un dispositivo central (Nodo Coordinador) con todos los periféricos (Nodo Sensor) dentro de su rango de alcance mediante el empleo de broadcast [16], en la cual los Xbee (módulos comerciales que utilizan la tecnología ZigBee) conectados a los módulos de sensado operan en modo router y el Xbee coordinador se conecta directamente a la Raspberry Pi.

La figura 3 ilustra el proceso de comunicación para la adquisición de la temperatura, corriente y voltaje de los módulos fotovoltaicos. Este proceso comienza en el momento que el Coordinador solicita al Router, a través de su dirección MAC, la información recabado por cada uno de sus sensores; el Router almacena la dirección MAC del Coordinador, empaqueta la información solicitada en un *Frame data* [17] y realiza la transmisión de un promedio de las mediciones realizadas. De existir algún error en la comunicación el coordinador lleva a cabo la solicitud nuevamente hasta obtener una respuesta correcta. Una vez recibida la información por el Coordinador, la Raspberry Pi realiza el desempaquetamiento y conversión de la información contenida en el paquete de datos, y posteriormente la almacena en una base de datos incluyendo la fecha y hora de recepción para poder ser visualizado por cualquier dispositivo conectado a Internet. Este proceso

de solicitud y recepción de información se repite constantemente en intervalos de 10 minutos.

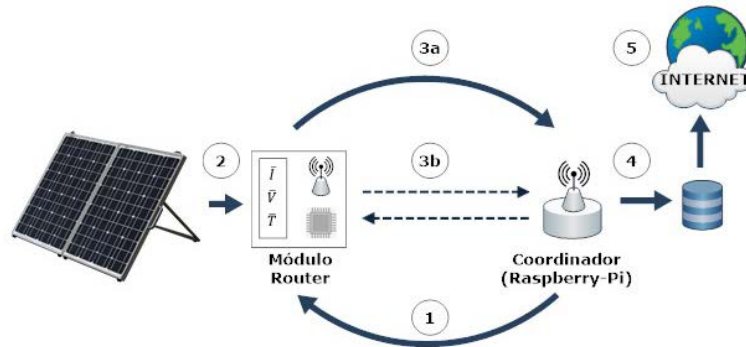


Figura 3 Proceso de comunicación y almacenamiento de información de la red de sensores inalámbricos para un par Coordinador-Router.

## 2.5 Componentes del Sistema

### Sensores

Los parámetros medidos a través de los módulos de sensado (Voltaje, Corriente y Temperatura) corresponden a las variables esenciales presentes en los módulos fotovoltaicos. Para realizar estas mediciones fueron empleados dos sensores analógicos: un sensor lineal de efecto Hall (ACS712-05B) para la medición de corriente, un divisor de tensión con aislamiento galvánico para la medición de voltaje y un sensor digital DS18B20 para la medición de la temperatura del panel fotovoltaico. Los sensores envían la información recabada hacia el micro controlador, cuando este la solicita, en intervalos de 5 segundos. La figura 4 muestra el diagrama electrónico de acondicionamiento para la señal de los sensores hacia el microcontrolador.

### Micro controlador PSoC 4

El micro controlador implementado en los módulos de sensado fue el PSoC CY 8C4128AXI-483 de la familia 4 de la compañía Cypress Semiconductor (figura 5), el cual posee una arquitectura ARM Cortex-M0 de 32 bits, 36 pines de propósito general (digital/analógico) programables y dos bloques reconfigurables para comunicación SPI, I2C o UART.

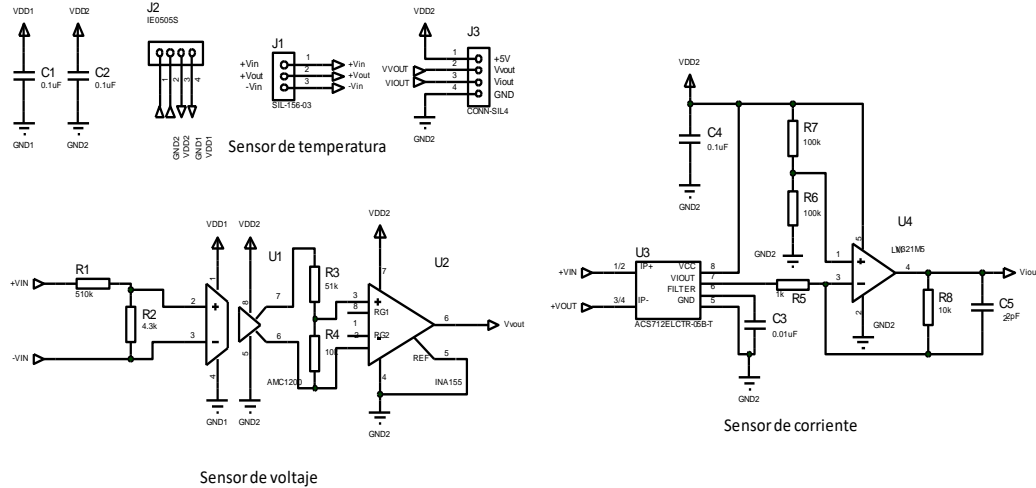


Figura 4 Diagrama eléctrico de los sensores de voltaje, corriente y temperatura.



Figura 5 Microcontrolador PSoC CY 8C4128AXI-483 sistema de monitoreo inalámbrico.

El código de programación implementado en los módulos de sensado es:

```

/*=====
                                CODIGO DE COMUNICACIÓN DEL MÓDULO ROUTER
=====*/

//-----Importamos Librerías-----
#include <DallasTemperature.h> //librería para medición de sensores DS18B20
#include <OneWire.h> //librería para protocolo OneWire

//-----Declaramos contantes-----
#define BUS_ONE_WIRE 3 //pin de comunicación OneWire
#define TX_NUM 24 //numero de bytes a enviar al coordinador
#define RX_NUM 17 //numero de bytes recibidos
#define TX_BYTE 6 //bytes a enviar en el frame de los sensores

//-----Declaramos variables-----
float Temp; //variable para almacenar temperatura
byte TX_DATA[TX_NUM]; //creamos el frame para enviar datos al xbee
byte SENSORS[TX_BYTE]; //array para almacenar los bytes de sensores a enviar
byte RX_DATA[RX_NUM]; //array para almacenar los bytes recibidos
long int checksum=0; //variable para almacenar el checksum
short int Vol,Amp; //variable para almacenar valor de sensores

OneWire oneWire(BUS_ONE_WIRE); //indicamos el pin a emplear en el protocolo
DallasTemperature sensors(&oneWire); //vinculamos librería onewire con dallas

//Indicamos la dirección ROM del DS18B20:
DeviceAddress Sensor1={0x28,0xE9,0x07,0x15,0x04,0x00,0x00,0xD7};
    
```

```

void setup(){
  Serial.begin(9600);           //establecemos comunicaci3n serial
  Serial1.begin(9600);         //establecemos comunicacion para el xbee
  sensors.begin();             //inicializamos la medicion en la libreria
  sensors.setResolution(Sensor1,10); //indicamos la resolucio del sensor1

  //Llenamos el frame de envio
  TX_DATA[0]=0x7E;
  TX_DATA[1]=0x00;
  TX_DATA[2]=0x14;
  TX_DATA[3]=0x10;
  TX_DATA[4]=0x00;           //indicamos el ID del frame
  TX_DATA[13]=0xFF;         //indicamos la direccio de red
  TX_DATA[14]=0xFE;
  TX_DATA[15]=0x00;         //cantidad de saltos
  TX_DATA[16]=0x00;}        //opciones de transmision

void loop(){
  Vol=analogRead(0);         //leemos el valor del sensor de voltaje
  Amp=analogRead(1);         //leemos el valor del sensor de corriente
  sensors.requestTemperatures(); //comando para leer la temp de dispositivos
  Temp=sensors.getTempC(Sensor1); //obtenemos la temp del sensor1

  SENSORS[0]=(int(Temp*100))>>8&0xFF; //obtenemos MSB de temp
  SENSORS[1]=(int(Temp*100)); //obtenemos LSB de temp
  SENSORS[2]=Vol>>8&0xFF; //obtenemos MSB de voltaje
  SENSORS[3]=Vol&0xFF; //obtenemos LSB de voltaje
  SENSORS[4]=Amp>>8&0xFF; //obtenemos MSB de corriente
  SENSORS[5]=Amp&0xFF; //obtenemos LSB de corriente

  if(Serial1.available(>0){ //si hay datos en el buffer de entrada

    for(int i=0;i<RX_NUM;i++){ //almacenamos todos los datos recibidos
      RX_DATA[i]=Serial1.read();
      Serial.print(RX_DATA[i],HEX);}
    Serial1.clear(); //descartamos la info que no fue almacenada

    if (RX_DATA[3]==0x90&RX_DATA[15]==0x01)//verificamos si recibimos lo deseado
    {Serial.println("ok");
      for(int i=17;i<TX_NUM-1;i++){ //almacenamos los valores de los sensores
        TX_DATA[i]=SENSORS[i-17];}

      for(int i=5;i<13;i++){ //almacenamos la direccio del xbbe con quien
        TX_DATA[i]=RX_DATA[i-1];} // nos vamos a comunicar

      for(int i=3;i<TX_NUM-1;i++){ //obtenemos la suma de los bits
        checksum=checksum+TX_DATA[i];}
      TX_DATA[TX_NUM-1]=0xFF-(checksum&0xFF);//Almacenamos el checksum

      for (int i=0;i<TX_NUM;i++){ //enviamos los datos solicitados
        Serial.print(TX_DATA[i],HEX);
        Serial1.write(TX_DATA[i]);}
      }
    Serial.print(' ');}
  checksum=0; //resetamos el checksum
  Serial1.clear(); //limpiamos el buffer de recepcio
  /*=====
                               FIN
  =====*/

```

Como se puede observar en el c3digo presentado, el microcontrolador ejerce dos funciones dentro del m3dulo de sensado. La primera de estas consiste en realizar la captura de informaci3n de las magnitudes de voltaje, corriente y temperatura, para posteriormente llevar a cabo un promedio de las mismas, proceso que se

repite iterativamente en intervalos de 5 segundos hasta que el Coordinador solicite la información. La segunda función se centra en establecer la comunicación inalámbrica con el coordinador a través del módulo Router Xbee, lo cual se lleva a cabo mediante la implementación del protocolo UART enviando un paquete de datos con un contenido de 24 Bytes a una tasa de transferencia de 96 kbps (figura 6).

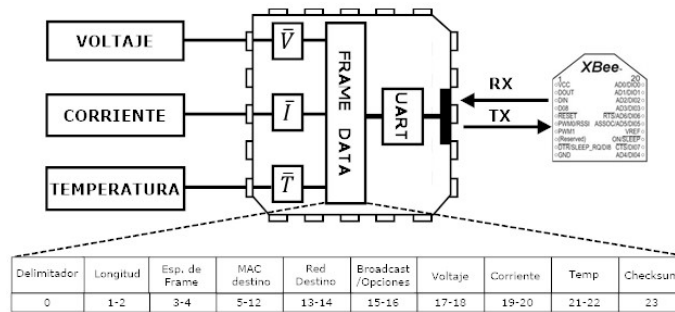


Figura 6 Funciones del microcontrolador CY8C4125AXI-483 en módulo de sensado.

## Servidor Web

La implementación del servidor web se realiza a través de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi debido a sus ventajas respecto a las computadoras convencionales como lo son su bajo costo, pequeñas dimensiones y mínimo consumo energético [7].

Por otro lado, además de la función de servidor web, la Raspberry Pi también se encuentra encargada de la recepción de información proveniente de los módulos de sensado así como de establecer la conexión UART con el Xbee Coordinador. La programación realizada en la Raspberry Pi se llevó a cabo mediante el lenguaje de programación Python, permitiendo el almacenamiento de la información recibida en una base de datos MySQL. Lo anterior cual en conjunto con el uso del servidor web HTTP de código abierto Apache, implementado en la tarjeta Raspberry Pi, permite la visualización de la información transmitida, y su respectiva hora de medición, a través de cualquier dispositivo conectado a la red [8,18], El código de programación es descrito a continuación e ilustrado en la figura 7:

```

"""----- IMPORTAMOS LIBRERIAS -----"""
import MySQLdb                                #importamos libreria para crear db en mysql
    
```



```
import serial                                #importamos libreria para comunicacion serial
import time                                  #importamos libreria para delays
import sys                                    #importamos libreria del sistema

"""----- DATOS PARA LA COMUNICACION LA BD ----- """
DB_HOST='localhost'                         #indicamos el host de la base de datos
DB_USER='xxxx'                               #indicamos el nombre de usuario de la bd
DB_PASS='xxxxxx'                             #indicamos la contraseña de la base de datos
DB_NAME='Ensayo1'                             #indicamos el nombre de la base de datos

"""-----CONSTANTES Y VARIABLES----- """
RX_NUM=22                                    #numero de bytes a recibir
SENSOR_NUM=6                                #numeros de byte recibidos para el sensor
TxBuffer=[]                                  #bufer de transmision
SensorBuffer=[0,0,0,0,0,0]                  #buffer para almacenar el valor de los sensores
checksum=0                                    #creamos el checksum para sumar bits

"""----- INICIAMOS SERIAL Y DB ----- """
ser=serial.Serial('/dev/ttyAMA0',9600,timeout=.5) #iniciamos la comunicacion por el puerto serie
bd=MySQLdb.connect(DB_HOST,DB_USER,DB_PASS,DB_NAME) #establecemos conexion con la base de
datos
cursor=bd.cursor()
cursor.execute("DROP TABLE IF EXISTS XbeeTable")
cursor.execute("CREATE TABLE XbeeTable(id INT PRIMARY KEY AUTO_INCREMENT,Voltaje
DECIMAL(4,2),Corriente DECIMAL(4,2),Temperatura DECIMAL(5,3),Fecha VARCHAR(8),Hora VARCHAR(8))")

#llenamos los buffers de salida
TxBuffer.append(0x7E)
TxBuffer.append(0x00)
TxBuffer.append(0x0F)
TxBuffer.append(0x10)
TxBuffer.append(0x00) #cambiamos el ID para poder enviar a varios
TxBuffer.append(0x00) #cambiamos el MAC adress para poder en viar a
varios
TxBuffer.append(0x13)
TxBuffer.append(0xA2)
TxBuffer.append(0x00)
TxBuffer.append(0x40)
TxBuffer.append(0xA8)
TxBuffer.append(0x1F)
TxBuffer.append(0xDE) #fin de la direccion MAC
TxBuffer.append(0xFF)
TxBuffer.append(0xFE)
TxBuffer.append(0x00)
TxBuffer.append(0x00)
TxBuffer.append(0x01) #byte de solicitud
TxBuffer.append(0x00)

TX_NUM=len(TxBuffer)
CHECKNUM=TX_NUM-1

"""----- FUNCION PARA CONVERTIR BYTES A NUMERO ENTERO-----"""
def BytesToInt(x):
    for i in range(SENSOR_NUM):
        #convertimos los caracteres de entrada a enteros
        SensorBuffer[i]=int(x[i+15].encode('hex'),16)
    y=(SensorBuffer[0]<<8)|SensorBuffer[1]
    if y>=32768:
        y=-1*(y^0xffff)
    u=(SensorBuffer[2]<<8)|SensorBuffer[3]
    if u>=32768:
        u=-1*(u^0xffff)
    v=(SensorBuffer[4]<<8)|SensorBuffer[5]
    if v>=32768:
        v=-1*(v^0xffff)
    return y,u,v

try:
    while True:
```

```

#colocamos un switch case para cambiar los valores del xbee con el que
#nos queremos comunicar.

for i in range(3,CHECKNUM):          #obtenemos el checksum
    checksum=checksum+TxBuffer[i]
    TxBuffer[CHECKNUM]=(0xFF-(checksum&0xFF))

print (TxBuffer)                    #visualizamos lo que vamos a enviar

for i in range(TX_NUM):              #enviamos la informacion
    ser.write(chr(TxBuffer[i]))
data=ser.read(RX_NUM)                #recibimos informacion

print data.encode('hex')             #visualizamos la informacion recibida

temp,volt,amp=BytesToInt(data)
temp=temp/100.0
volt=volt*80/1023
amp=amp*6/1023
print temp
print volt
print amp

fecha=time.strftime("%x")            #guardamos el valor actual de la fecha
hora=time.strftime("%X")            #guardamos el valor actual de la hora
cursor.execute("INSERT INTO XbeeTable(Voltaje,Corriente,Temperatura,Fecha,Hora)
VALUES(%f,%f,%f,%s,%s)"%(volt,amp,temp,fecha,hora))
# bd.commit()

checksum=0                           #reseteamos el checksum
ser.flushInput()                      #limpiamos el buffer de entrada
time.sleep(5)
bd.commit()

except KeyboardInterrupt:            #condicion de interrupcion
ser.flushInput()
ser.close()                          #cerramos la comunicacion serial
bd.commit()

```

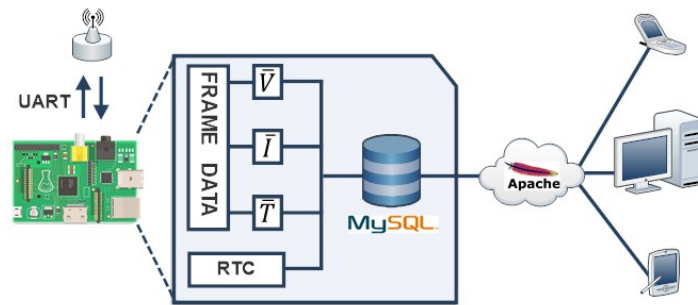


Figura 7 Implementación de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi como servidor Web.

### 3. Resultados

Para llevar a cabo las pruebas correspondientes el sistema de monitoreo fue probado en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Para establecer a la tarjeta Raspberry como servidor web, esta fue integrada al sistema de Red de Área Local (LAN por sus siglas en inglés). Del mismo modo las pruebas fueron realizadas empleando un módulo fotovoltaico

mono cristalino de 20 V y 4.5 A. Los resultados de la interfaz web tras el empleo del sistema de monitoreo fotovoltaico son mostrados en la figura 8.

Como se puede observar dicha figura presenta una toma de pantalla de la página web generada a partir de los resultados obtenidos una vez realizada la implementación del sistema de monitoreo inalámbrico dentro de la LAN. Las mediciones realizadas son presentadas en un formato de tabla, en el intervalo de tiempo especificado. Es importante indicar que durante la operación del sistema no se registraron pérdidas de datos, lo cual se puede corroborar con los gráficos presentados en figuras 9 a 11 correspondientes a mediciones de voltaje, corriente y temperatura durante un día estándar.


**Instituto Tecnológico Superior Progreso**  
**Universidad Autónoma de Yucatán**  
 "Sistema de Monitoreo de Paneles Fotovoltaicos"

FECHA	HORA	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)	TEMPERATURA (°C)
13/05/15	10:43	14.1	3.3	68.8
13/05/15	10:53	14.8	3.5	71.4
13/05/15	11:03	15.1	3.5	72.8
13/05/15	11:13	15.4	3.45	74.6
13/05/15	11:23	16.2	4.00	77.0
13/05/15	11:33	17.5	4.82	79.2
13/05/15	11:43	17.9	4.80	80.2
13/05/15	11:53	18.1	4.65	82.7
13/05/15	12:03	19.3	4.27	83.8
13/05/15	12:13	19.5	4.30	83.7
13/05/15	12:23	19.2	4.15	84.8
13/05/15	12:33	19.5	4.15	83.8
13/05/15	12:43	19.6	4.23	84.0
13/05/15	12:53	19.6	4.20	83.9
13/05/15	12:53	19.3	4.10	78.9
13/05/15	13:03	19.4	4.15	81.8
13/05/15	13:13	19.0	3.99	85.4
13/05/15	13:23	18.9	3.89	83.2
13/05/15	13:33	19.1	3.95	85.0

Figura 8 Visualización de mediciones del panel fotovoltaico (página Web generada).

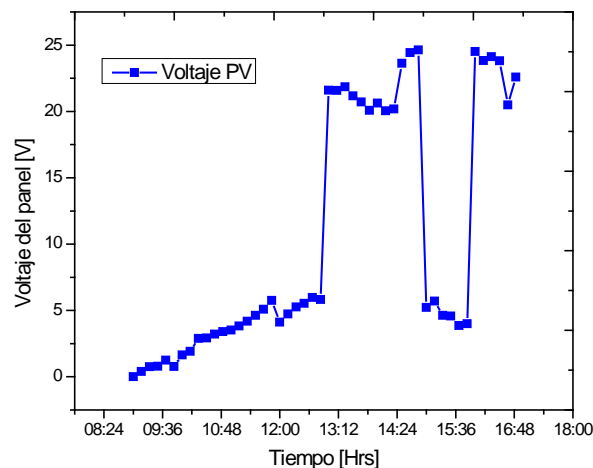


Figura 9 Mediciones de voltaje del panel fotovoltaico durante un día estándar.

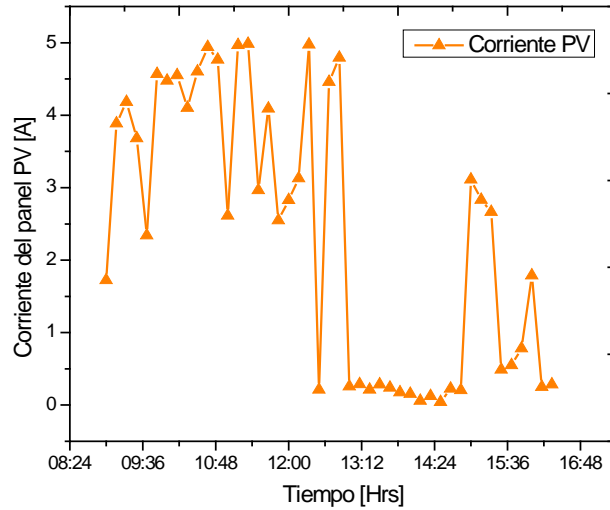


Figura 10 Mediciones de corriente del panel fotovoltaico durante un día estándar.

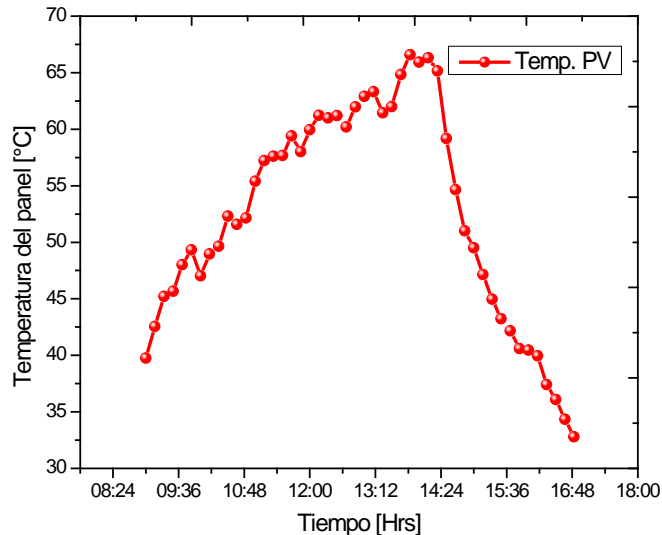


Figura 11 Mediciones de temperatura del panel fotovoltaico durante un día estándar.

Una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema, una evaluación económica del costo del mismo fue llevada a cabo. La tabla 2, presenta la información de costos de construcción de la red de monitoreo realizando una comparativa entre los componentes de última generación empleados como lo son la tarjeta Raspberry Pi y el micro controlador PSoC CY8C4125AXI-483 respecto a las opciones convencionales para el desarrollo en el ámbito de investigación de este tipo de sistemas. Como se puede observar la implementación de la Tarjeta Raspberry Pi disminuye ampliamente los costos de inversión y desarrollo del nodo

sensor aun considerando el empleo de la misma tecnología de transferencia inalámbrica. Por otra parte, el uso de micro controladores de última generación no convencionales supera en demasía los beneficios económicos y tecnológicos, respecto a empleo de equipos comercialmente aceptados en la actualidad como lo son las tarjetas de desarrollo Arduino. Por lo tanto se concluye que el uso de los componentes propuestos presenta una opción viable y mucho más económico que otras opciones disponibles para el desarrollo del sistema.

Tabla 2 Costos comparativos de construcción de los nodos sensor y coordinador.

	<b>Elementos empleados</b>	<b>\$ (USD)</b>	<b>Elementos convencionales</b>	<b>\$ (USD)</b>
<b>Nodo sensor</b>	Raspberry	29.00	Computadora	240.00
	Modulo Xbee	32.00	Módulo Xbee	32.00
	<b>Total</b>	<b>61.00</b>	Adaptador Xbee-Pc	20.50
			<b>Total</b>	<b>292.50</b>
<b>Nodo coordinador</b>	CY8C4125AXI-483	4.00	Arduino UNO	11.00
	Módulo Xbee	23.00	Módulo Xbee	32.00
	Sensores	19.00	Sensores	19.00
	<b>Total</b>	<b>55.00</b>	<b>Total</b>	<b>62.00</b>

#### 4. Conclusiones

La red inalámbrica para el monitoreo de equipos fotovoltaicos propuesto fue desarrollado con éxito. El empleo del módulo con tecnología Zeeegbee permitió establecer comunicación a grandes distancias con un protocolo de bajo nivel posibilitando controlar todos los aspectos de la transmisión y recepción de datos. Del mismo modo, la substitución de una computadora convencional por un sistema embebido Raspberry Pi y el empleo del micro controlador CY8C4125AXI-483 con arquitectura ARM de 32 bits permitieron alcanzar de manera eficiente los objetivos planteados para el presente proyecto, reduciendo los costos de los componentes y minimizando el consumo energético del mismo.

#### 5. Bibliografía y Referencias

- [1] V. Tyagi, N. Rahim, J. Selvaraj, "Progress in solar PV technology: Research and achievement". Renewable and Sustainable Energy Review. Vol. 20. Pp. 443-461.

- [2] M. Tzuc, O. Bassam, A. Flota-Bañuelos, M. Ordoñez E, Ricalde-Cab, L. Quijano, R. Vega-Pasos, Thermal Efficiency Prediction of a Solar Low Enthalpy Steam Generating Plant Employing Artificial Neural Networks. 2016. *Intelligent Computing Systems*. Pp. 61-73.
- [3] K. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, H. Fayaz, "A review on solar energy policy". *Renewable and Sustainable Energy Review*. Vol. 15. 2011. Pp. 2149-2163.
- [4] F. Shariff, N. A. Rahim, H. Wooi Ping, "Zigbee-based data acquisition system for online monitoring of grid-connected photovoltaic system". *Expert Systems with Applications*. Vol. 42. 2015. Pp. 1730-1742.
- [5] P. Papageorgas, D. Piromalis, K. Antonakoglou, G. Vokas, D. Tseles, K. G. Arvanitis, "Smart solar panels: In-situ monitoring of photovoltaic panels based on wired and wireless sensor networks". *Energy Procedia*. Vol. 36. 2013. Pp. 535-545.
- [6] R. Kaamal, *Embedded Systems*. 2008. Mc-GrawHill. USA.
- [7] O. May Tzuc, R. Quijano Cetina, F. Fernández Castillo, *Sistema Domótico de control de luces mediante una aplicación Android basada en una tarjeta Raspberry-Pi. Tendencias de Investigación y Desarrollo*. 1 Ed. 2015.
- [8] M. Romero A. *Implementación de servicios de red mediante una Raspberry Pi*. 2014. Zaragoza, España.
- [9] S.Monk, *Raspberry Pi cookbook*. 2014. O'Reilly. USA.
- [10] L-C. Huang, H-C. Chang, C-C. Chen, C-C. Kuo. "A ZigBee-based monitoring and protection system for building electrical safety". *Energy Build*. Vol. 43. 2011. Pp: 1418-1423.
- [11] NC. Batista, R Melício, JCO. Matias, JPS. Catal\~ao, "Photovoltaic and wind energy system monitoring and bulding/home energy management using ZigBee devices within a smart grid". *Energy*. Vol. 49. 2013. Pp. 306-315.
- [12] W-T. Sung, Y-C. Hsu. "Designing an industrial real-time measurement and monitoring system based on embedded system and ZigBee". *Expert Systems with Applications*. Vol. 38. 2011. 4522-4529.

- [13] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, R. Verdone, "An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution". Basel, Switzerland, *Sensors-Open Acces Journal*. Vol. 9. 2009. Pp. 6869-6896.
- [14] A. Mainwaring, J. Polastre, R. Szewczyk, D. Culler, J. Anderson. *Wireless Sensor Networks for Habitat Monitoring*. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications. 2002. New York, USA.
- [15] J. Heidemann, F. Silva, C. Intanagonwiwat, R. Govindan, D. Estrin, D. Ganesan, *Building Efficient Wireless Sensor Networks with Low-Level Naming*. Proceedings of the eighteenth ACM symposium on Operating systems principles. 2009. New York, USA.
- [16] A. Oyarce, *Guía de usuario Xbee serie 1*. MCI Ltda. Santiago de Chile. 2010.
- [17] R. Fallody, *Building Wireless Sensor Networks*. O'Reilly. USA. 2011.
- [18] R. González Duque, *Phyton para todos*. Creative Common. España.

## **6. Autores**

M.I. Oscar de Jesús May Tzuc, estudió en la Universidad Autónoma de Yucatán obteniendo el grado de Ingeniero Físico con especialidad en Instrumentación y Control electrónico en 2014. En 2016 obtuvo el grado de Maestro en Ingeniería con especialidad en Energías Renovables por parte de la Universidad Autónoma de Yucatán. Actualmente es profesor del Instituto Tecnológico Superior Progreso, sus áreas de interés son los sistemas embebidos, instrumentación y control electrónico, sistemas fototérmicos y aplicación de herramientas de inteligencia artificial.

M.I. Renán Gabriel Quijano Cetina, es egresado por parte del Instituto Tecnológico de Mérida en el cual obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico. Maestro en Ingeniería Mecatrónica por parte de la Universidad Modelo, actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Yucatán en el departamento de Ingeniería Mecatrónica. Entre sus áreas de interés se encuentran los sistemas embebidos, automatización y sistemas de control automático.

M.C. Juliana González Quijano es Maestra en Ciencias con especialidad en Biotecnología, por parte de la Universidad Autónoma de Yucatán. Es profesora de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior Progreso. Entre sus intereses se encuentran el aprovechamiento sustentable de fuentes energéticas de energía, procesos de producción en biocombustibles y sistemas alternativos de energía.

Dr. José Daniel Ortiz López es estudiante de octavo semestre de la Licenciatura en Ingeniería en Energías Renovables, en el Instituto Tecnológico Superior Progreso.



# ENCODER MAGNÉTICO PARA MEDICIONES ANGULARES DE ALTA PRECISIÓN

***Miguel Antonio Ojeda Moreno***

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

*miky@miky.com.de*

***Eduardo Zúñiga***

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

*eduardo.p.zuniga@gmail.com*

## **Resumen**

Se presenta el desarrollo de un sistema de medición de ángulos basado en campos magnéticos permanentes y adquisición de datos electrónicos, de muy alta precisión, para aplicaciones en ambientes muy agresivos.

**Palabra(s) Clave(s):** Electrónica, encoder magnético, mecatrónica, medición de ángulos, procesamiento de señales

## **1. Introducción**

Si bien existen numerosos desarrollos de medidores magnéticos de ángulo de giro (“*encoder’s*”), no siempre son aptos a condiciones extremas de utilización. Para aquellos requerimientos en donde se exija muy alta precisión en la medición, con la capacidad de hacerlo en ambos sentidos sin puesta a 0 y condiciones ambientales muy desfavorables (humedad, temperatura y suciedad), no existen medidores de confiabilidad que puedan garantizar los resultados. Frente a esta necesidad se desarrolló un sistema magnético de medición continua de ángulo de rotación que cumple con esas necesidades.

## **2. Estado del Arte en “*encoder’s*” magnéticos/ópticos**

Tal vez sea la empresa SNR, fabricante de rodamientos, y que lleva varios años trabajando en el desarrollo de sensores magnéticos, la que más ha avanzado en

este tipo de medidores. Es creadora de la primera generación que mide, sin contacto, la velocidad de rotación. Más recientemente, una nueva tecnología denominada ASB (*Active Sensor Bering*: rodamiento sensor activo) permite determinar, sin contacto, la velocidad de rotación y las posiciones a partir de la medición del campo magnético generado por un imán multipolar y un sensor magnético de efecto Hall o de magneto resistencia (AMR). Posteriormente, se desarrolló un conjunto de imán/sensor que controla la posición angular absoluta con alta resolución. El imán se dispone en una segunda pista que incorpora singularidades magnéticas y el sensor dispone de elementos Hall integrados en silicio, dispuestos en cuerpos en forma de pequeñas barritas y asociados en el mismo circuito integrado (*chip*) a su circuito de acondicionamiento. Finalmente, se trabajó en lo que se ha denominado la tercera generación de sensores magnéticos, que consisten en una resistencia eléctrica sensible al campo magnético, compuesta por dos capas magnéticas conductoras separadas por una barrera aislante de unos nanómetros (milésimas de micra) de espesor. Este último desarrollo presenta importantes ventajas: mayor sensibilidad, menor consumo eléctrico, mejor relación señal/ruido, y un rango de temperatura más amplio.

Todos estos sistemas, si bien precisos y pertinentes para las aplicaciones para las que fueron desarrollados, presentan muy elevados costos de manufactura y, en determinadas condiciones de uso, pueden ser afectados por las condiciones ambientales.

En relación al encoder óptico absoluto, su principio de funcionamiento es muy similar al de un encoder incremental, en el que un disco que gira, con zonas transparentes y opacas, interrumpe un haz de luz captado por foto receptores; luego, estos transforman los impulsos luminosos en impulsos eléctricos, los cuales son tratados y transmitidos por la electrónica de salida.

Respecto a los encoders incrementales, los encoders absolutos muestran diferencias desde el punto de vista funcional. Mientras en los encoders incrementales la posición está determinada por el cómputo del número de impulsos con respecto a la marca de cero, en los encoders absolutos la posición

queda determinada mediante la lectura del código de salida, el cual es único para cada una de las posiciones dentro de la vuelta.

Por consiguiente, los encoders absolutos no pierden la posición real cuando se corta la alimentación (incluso en el caso de desplazamientos), hasta un nuevo encendido (gracias a una codificación directa en el disco). La posición está actualizada y disponible sin tener que efectuar, como en el caso de los encoders incrementales, la búsqueda del punto cero.

En el proyecto desarrollado se tiene en cuenta este método, pero la codificación del disco es magnética.

### 3. Objetivos

Diseñar y construir un sistema de medición angular continuo, confiable, de alta precisión y apto para trabajar en condiciones ambientales desfavorables por la existencia de temperatura, humedad y polvillo elevadas. La precisión esperada es de 0.01 grado sexagesimal

### 4. Método y Materiales

El "HAL 810" de la firma Micronas es un circuito integrado monolítico que proporciona una señal de salida modulada por ancho de pulso (PWM). El ciclo de trabajo de la señal PWM es proporcional al flujo magnético que atraviesa el cuerpo del *chip* *hal 810* (figura 1).

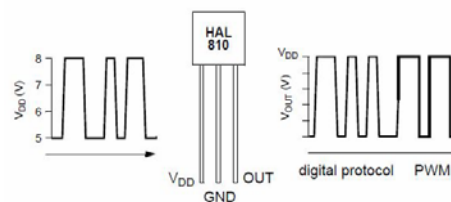


Figura 1 Ciclo de trabajo de la señal PWM, proporcional al flujo magnético.

El componente de campo magnético externo perpendicular al *chip* genera una tensión de Hall. El circuito integrado (*integrated circuit: IC o chip*) es sensible al norte magnético y a la polaridad sur. Esta tensión se convierte en un valor digital, se analiza en la unidad de procesamiento de señal digital (DSP), de acuerdo con

los ajustes de la EEPROM, convertidos a una salida modulada de ancho de pulso y estabilizado por una salida *push-pull*. Además, contiene un circuito de compensación de temperatura interna y la compensación *off-set* permite operar dentro del rango de temperatura completo con cambios mínimos en la exactitud y alta estabilidad de desplazamiento.

También, el sensor del IC está equipado con dispositivos para protección contra sobretensión e inverso-tensión en todos los *pins*. La figura 2 muestra un esquema de bloque del mismo.

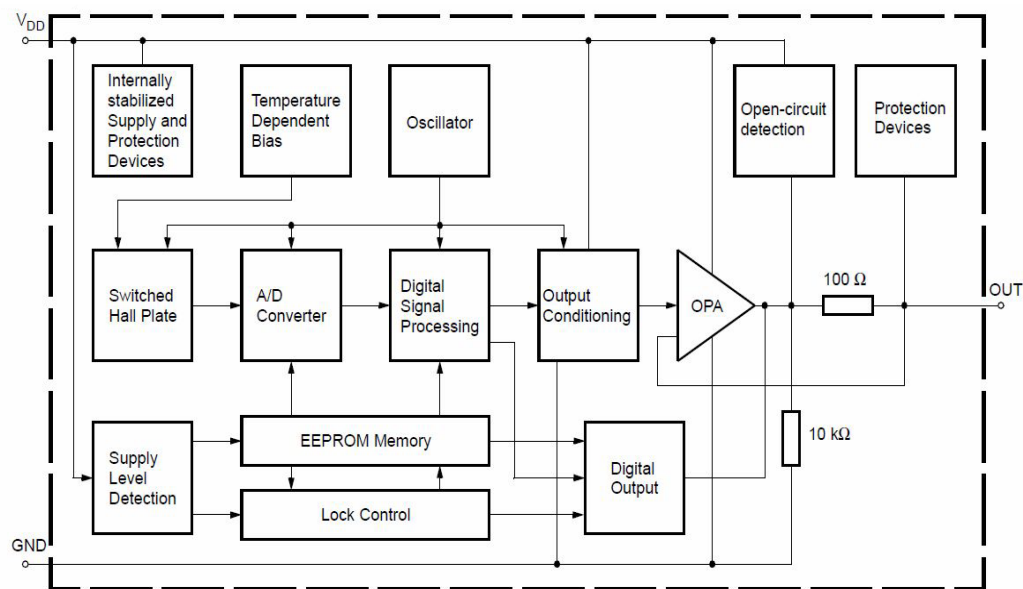


Figura 2 Diagrama de bloques del circuito del HAL 810.

Durante el diseño de la aplicación se ha tenido en cuenta que el ADC-LECTURA máximo y mínimo no se supere durante la calibración y operación del IC. En consecuencia, los campos magnéticos máximo y mínimo, que pueden ocurrir en el intervalo operativo de una aplicación específica, no deberían saturar el convertidor A/D.

Considerando que el convertidor A/D se satura a campos magnéticos muy por encima, respectivamente, de los límites de los alcances magnéticos, estos parámetros pueden ser calibrados en la EEPROM del sensor para ajustar su rango.

Esta banda de seguridad entre rango magnético determinado y cierto radio de acción ayuda a evitar la saturación. La figura 3 muestra la relación lineal entre el valor de compensación B y la ADC, para distintas relaciones de mili tesla (mT) derivados de la distancia entre el sensor y el campo magnético del imán.

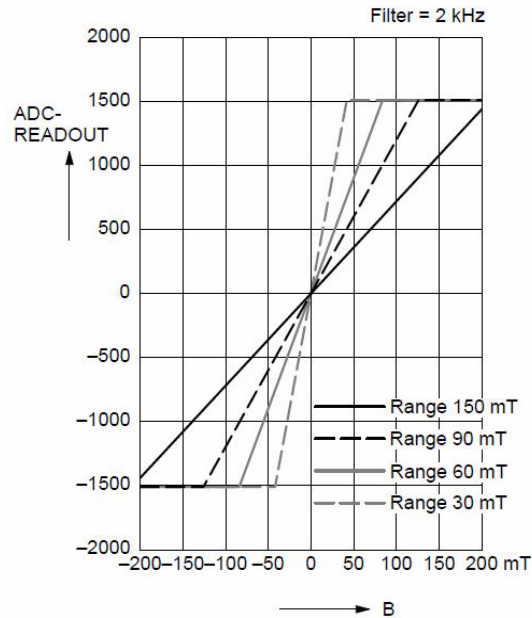


Figura 3 Diagrama indicativo de la relación B/ADC para distintos rangos de mT.

Como se puede apreciar en la figura 4, el *chip* tiene una muy alta linealidad en el rango de los +/- 10 grados. Por lo tanto, se dispuso en forma circular 36 sensores con una separación de 10 grados entre sí, y un solo imán que los atraviesa perpendicularmente, separados en dos grupos de 18 sensores cada uno, controlados por un microcontrolador modelo "Atmega 162" de la línea Atmel.

Con este procesador se accede en forma paralela a los 18 sensores al mismo tiempo y se analizan las señales de todos ellos. De esta forma, se obtiene un altísimo tiempo de respuesta. El microcontrolador que detecta la presencia del imán en su sector toma el control de la medición y se apresta a realizarla de una manera precisa. Realizando algoritmos de cálculo entre los tres sensores más cercanos al imán, y teniendo unalinealidad en la medición de 12 bits o 4096 escalones, se logra una discriminación aproximada de  $20^{\circ}$  grados/4096 o  $10^{\circ}$

grados/2048, o sea,  $0.005^\circ$ , con lo cual se ubica en el rango de  $0.01 \pm 0.005$  de error en la medición.

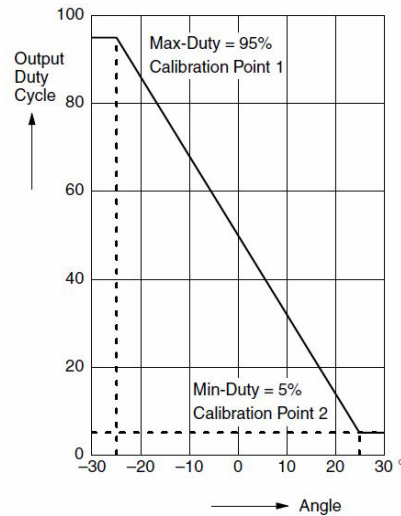


Figura 4 Relación lineal entre la señal de salida del ciclo y el ángulo medido.

La figura 5 muestra el control de la línea de alimentación y programación (VDD), mediante la cual se puede ingresar al sensor y realizar una reprogramación de parámetros en forma digital.

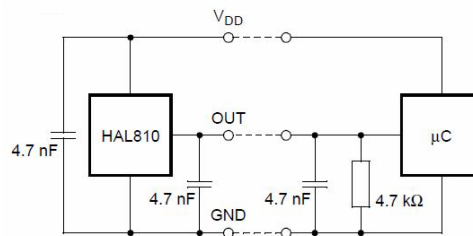


Figura 5 Diagrama de conexión de cada sensor al microprocesador.

La figura 6 muestra la señal de salida que se obtiene y permite la medición de la posición angular.

A través del *pin* VDD de alimentación se envía un comando pidiendo el valor del campo magnético y éste sale a través del *pin* out

Se optó por un diseño que contempló la ejecución de dos plaquetas de formato circular. Una de ellas con el circuito impreso sobre el cual se alojan los

componentes electrónicos que captan la variación de onda y la transforman en impulsos eléctricos que son procesados para emitir la señal que identifica la posición del punto de referencia. La otra contiene dos pistas de perforaciones para permitir el paso del campo magnético del imán y, de este modo, influenciar sobre el detector.

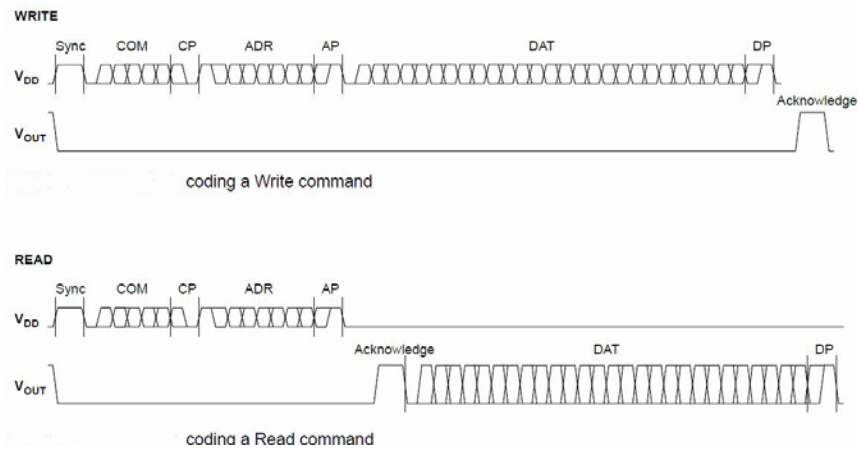


Figura 6 Señal de comando y lectura realizado entre el pin VDD y el pin out del sensor.

La figura 7 muestra ambas plaquetas circulares y la referencia de tamaño con respecto a una moneda de 25 centavos de peso.

Se utilizaron imanes cerámicos de industria nacional. La plaqueta se hizo construir en la empresa Solydes SA. El procesador es modelo "Atxmega 128 A4u" de la línea Atmel.

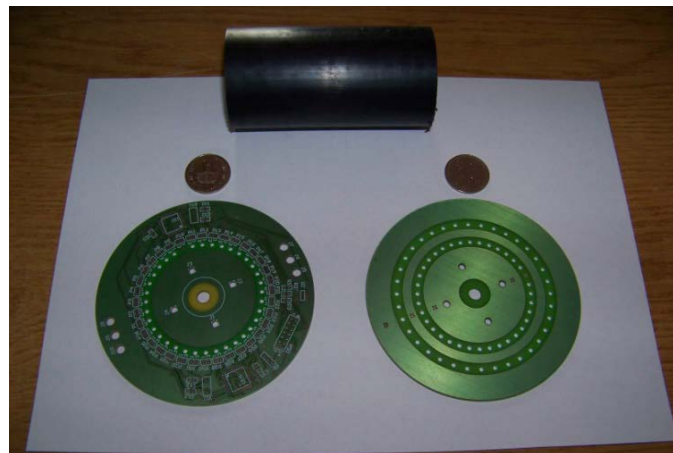


Figura 7 Plaqueta de circuito impreso (izquierda) y plaqueta porta perforaciones e imanes.

Para el trabajo de soldadura de los componentes se contrató a la empresa Armados Electrónicos SRL, por ser dificultoso, dado los tamaños de los componentes con los que se trabaja.

El software se realizó en lenguaje ASSEMBLER para asegurar el máximo de velocidad de lectura.

Para obtener excelente velocidad de respuesta, se realiza un pedido a los 18 sensores en forma simultánea: *Coding a Read command* (figura 6) y la lectura de la respuesta se realiza en forma serial/paralela de los 18 sensores y, luego, decodificando la información serial de cada sensor.

O sea, se leen los 18 sensores al mismo tiempo, lo cual da una altísima velocidad en la adquisición de los datos.

Una vez detectados los dos sensores más próximos al imán permanente, se realizan lecturas más precisas sobre estos dos.

Realizando un algoritmo sobre la interacción del imán con los dos sensores más próximos, se obtiene una lectura con un orden de exactitud de  $1/4094$  sobre los 10 grados de separación entre sensores, logrando una exactitud de  $0.0025 \pm 0.0001$ , superior a la prevista en el objetivo.

## 5. Ensayos de verificación

Finalizada la construcción del prototipo, se escribió el código de verificación y se construyó un dispositivo con el fin de evaluar el grado de exactitud y la eficacia de funcionamiento del medidor. Las figuras 8 y 9 muestran el dispositivo.



Figura 8 Dispositivo de prueba.





Figura 9 Dispositivo de prueba.

El software de verificación se diseñó de modo que pueda ser, luego, empleado para las mediciones en servicio. Por este motivo, presenta una pantalla con la información relevante. La figura 10 muestra lo indicado.

Se observa que la pantalla ofrece una visión gráfica de la variación de onda que identifica la posición instantánea del indicador. Sobre la parte superior derecha, un goniómetro circular y, a su lado izquierdo, un indicador numérico angular con una precisión de milésima de grado sexagesimal, superior a la prevista en los objetivos del proyecto. El programa permite realizar mediciones y posee comunicación serial utilizando conexiones RS232, RS485, Bluetooth. Además, incorpora el protocolo Modbus RTU para realizar lecturas con equipamiento estándar.

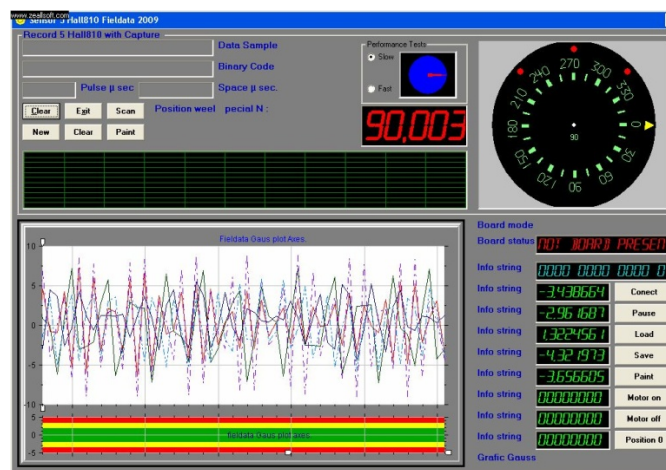


Figura 10 Pantalla indicadora de los parámetros más relevantes de la medición angular.

## 6. Conclusiones

La construcción de un dispositivo para el control de posicionamiento angular por sistema magnético (figura 11) ofrece significativas ventajas de precisión en las mediciones que otros sistemas no logran, figura 12.

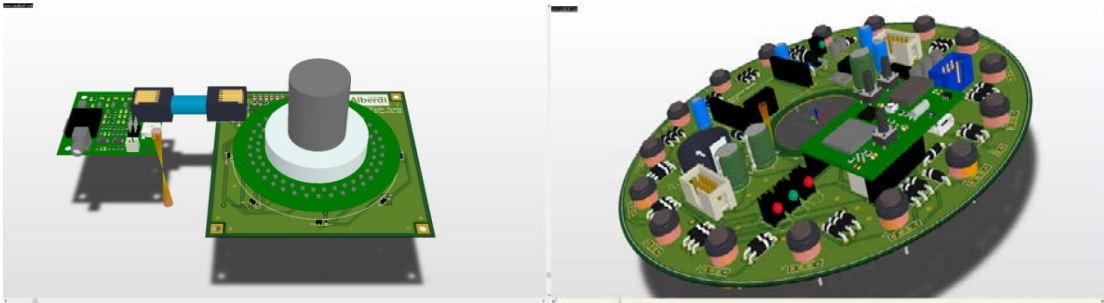


Figura 11 Modelo 3D del encoder magnético versión 1 y versión 8.

Por su construcción es recomendable para ambientes agresivos. Tiene un bajo costo de manufactura.

Sus aplicaciones son múltiples: sistemas de control de cierre de válvulas, posicionamiento de dispositivos para electro medicina, robótica, electrónica aplicada a procesos industriales, sistemas de lectura digitalizada y otros muchos.

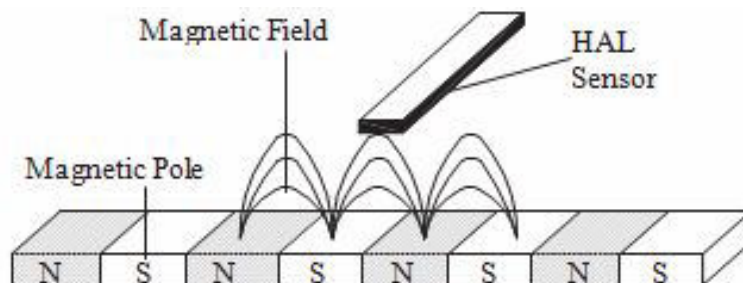


Figura 12 Efecto lineal de captura.

Este dispositivo se encuentra, actualmente, en un proceso de miniaturización y se están realizando ensayos industriales en ambientes peligrosos.

Se ha adaptado un módulo de comunicación Bluetooth por el cual puede realizarse una conexión inalámbrica de modo que se puedan realizar mediciones de uno o varios sensores a distancia y sin necesidad de cableado, sistema

especialmente desarrollado para ambientes donde existen gases peligrosos con probabilidades de explosión.

Muchas industrias son beneficiarias de este desarrollo: petrolera, química, agroalimentaria, nuclear.

## 7. Referencias

- [1] X. Li, W. Gao, H. Muto, Y. Shimizu, S. Ito, S. Dian, "A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage". *Precision Engineering*. Vol. 37. 2013. Pp. 771– 781.
- [2] H Kim, J. K. Kim, H. J. Shin, "A laser-based 2-dimesional angular deflection measurement system for tilting microplates". *Sensors and Actuators* 86. 2000. Pp. 141-147.
- [3] X. Tao, L. Haibao, L. Wusheng, "A robust photoelectric angular position sensor especially", *Sensors and Actuators*. Vol. 120. 2005. Pp. 311–316.
- [4] Y. Kikuchi, T. Yoneda, Y. Kataoka, K. Shiotani, H. Wakiwaka, H. Yamada, "Considerations of output voltage waveform on magnetic linear encoder for artificial heart using linear pulse motor". *Sensors and Actuators* Vol. 81. 2000. Pp. 309-312.
- [5] Y. Shia, H. Zhanga, X. Jianga, Q. Wenb, B. Han, "Design of output voltage waveform on magnetic encoder". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* Vol. 282. 2004. Pp. 317–320.
- [6] Comunicado SNR Rodamientos - 10/2007, Dossier de prensa, "La investigación de SNR alineada con el Nobel de Física", Sede de SNR ROULEMENTS, Dpto. de Comunicación.

## 8. Autores

Miguel Antonio Ojeda Moreno es profesor Adjunto, Universidad Nacional de Lomas de Zamora UNLZ, Facultad de Ingeniería, Ciclo Superior de especialización de Ingeniería Mecánica, Orientación Mecatrónica, Argentina.

Profesor Adjunto, Universidad Tecnológica Nacional UTN.BA, Facultad de Ingeniería, Ciclo Superior de especialización de Ingeniería Mecánica, Orientación Mecatrónica.

Eduardo Zúñiga es profesor Adjunto, Universidad Nacional de Lomas de Zamora UNLZ, Facultad de Ingeniería, Ciclo Superior de especialización de Ingeniería Mecánica, Orientación Mecatrónica.

Los autores agradecen al Ing. Ojeda y Asociados por el aporte de materiales y tecnología para la realización de este proyecto, y a las empresas Solydes SA y Armados Electrónicos SRL por su colaboración.

# **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y BASE DE TIEMPO PARA FUTURA SONDA ESTRATOSFÉRICA EN MISIÓN ESPACIAL DE ÓRBITA BAJA**

***Miguel Ángel Silva García***

Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México  
*12030542@itcelaya.edu.mx*

***Alejandro Espinosa Calderón***

Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México  
*alejandro.espinosa@itcelaya.edu.mx*

***José Alfredo Padilla Medina***

Instituto Tecnológico de Celaya, Tecnológico Nacional de México  
*alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx*

***Mario Alberto Mendoza Bárcenas***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Desarrollo Aeroespacial  
*mmendozab@ipn.mx*

***Lauro Santiago Cruz***

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, Coordinación de Electrónica  
*lsc@pumas.ii.unam.mx*

***Rafael Prieto Meléndez***

Universidad Nacional Autónoma de México, Grupo de Modelado y Simulación de Procesos  
*rafael.prieto@ccadet.unam.mx*

## **Resumen**

Los satélites de órbita baja (hasta 800 km) permiten la validación operativa de sistemas electrónicos y de instrumentación experimental, así como el monitoreo y registro de diversas variables físicas, dentro de tiempos de desarrollo reducidos. Además permiten ahorros económicos directos en su puesta en órbita y operación.

Antes de integrar satélites de órbita baja, se requiere validar experimentalmente, bajo condiciones de espacio cercano, componentes y equipos electrónicos, esto se hace en vuelos suborbitales.

En este artículo se describe el desarrollo de un sistema de adquisición de datos, enfocado al registro de datos de temperatura, que incluye un reloj de tiempo real para asociarla a los datos obtenidos como etiqueta de tiempo, almacenando los datos en una memoria SD. El núcleo computacional está basado en la tarjeta Arduino DUE, en torno a la cual se ha integrado un sistema de adquisición de datos, que incluye interfaces de conexión con periféricos, como un sensor de temperatura, un RTC, una pantalla LCD y una memoria SD. Adicionalmente, se discute y propone un esquema de futuras de pruebas del prototipo, en ambiente de termo-vacío, para certificación previa al vuelo en la sonda estratosférica.

**Palabra(s) Clave(s):** Arduino DUE, I2C, memoria SD, real time clock, SPI.

## 1. Introducción

La atmósfera se divide en diversas capas, la relación entre la altitud y la temperatura es distinta dependiendo de la capa atmosférica considerada: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. La estratosfera se sitúa entre la tropósfera y la mesósfera, y se extiende en una capa que va desde los 10 hasta los 50 km de altura aproximadamente. La temperatura aumenta progresivamente desde los  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la tropopausa hasta alcanzar los  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la estratopausa, esto es debido principalmente a la absorción de las moléculas de ozono que absorben radiación electromagnética en la región del ultravioleta. En la parte baja de la estratósfera la temperatura es relativamente estable, y en toda la capa hay muy poca humedad.

La estratósfera es una de las capas más importantes de la atmósfera ya que reúne el 90% del ozono presente en la atmósfera y absorbe del 97% al 99% de la radiación ultravioleta de alta frecuencia, sin embargo, esta capa sufre cambios a partir del efecto invernadero, un problema creciente que pudiera alterar su dinámica global y con ello el espesor de la capa [1]. Es por esta razón que los

satélites de órbita baja cobran importancia al medir diferentes variables en esta capa de la atmósfera.

El ozono de la atmósfera se mide con equipos desde la tierra o desde el aire con aviones, globos y satélites. Algunos equipos miden el ozono directamente tomando muestras de aire y otros en forma remota. Los equipos usan técnicas ópticas tomando la luz solar y láser como fuentes de luz o usan reacciones químicas propias del ozono [2]. Aunque por el momento no se propone medir ozono, esta será una variable futura de monitoreo, una vez que se haya validado la funcionabilidad en la estratósfera del sistema propuesto en este artículo.

Uno de los principales problemas que se presentan con este tipo mediciones es el costo elevado de los equipos usados en estos satélites, además de su difícil adquisición para experimentos con el objetivo de contribuir a una investigación. Existen diversas propuestas para sistemas en satélites de baja altura [3,4,5,6], a diferencia de dichas propuestas en este artículo se propone un sistema de monitoreo basado en tecnología Arduino DUE, la cual es comercial, fácil de adquirir y de relativo bajo precio.

Arduino es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto basada en una placa con entradas y salidas, analógicas y digitales. El microcontrolador de la placa se programa usando el “Arduino Programming Language” (basado en Wiring) y el “Arduino Development Environment” (basado en Processing). Esta plataforma ofrece diversas ventajas sobre otros microcontroladores, tales como:

- Barato: Las placas Arduino son relativamente baratas comparadas con otras plataformas microcontroladoras, muchas tarjetas Arduino cuestan menos de \$100 USD, a diferencia de otras tarjetas como la Basys 2 de Digilent cuyo valor está alrededor de los \$150 USD, o la tarjeta Chipkit Uno también de Digilent, que, aunque su precio es similar a las tarjetas Arduino, cuenta con menos recursos y pines.
- Multiplataforma: El software de Arduino se ejecuta en sistemas operativos Windows, Macintosh OSX y GNU/Linux. La mayoría de los sistemas microcontroladores están limitados a Windows.

- Entorno de programación amigable y claro: El entorno de programación de Arduino es de amigable interpretación para principiantes, pero suficientemente flexible y complejo para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo también.
- Código abierto y software extensible: El software Arduino está publicado como herramientas de código abierto, disponible para extensión por programadores experimentados. El lenguaje puede ser expandido mediante librerías C++ [7].

En este artículo se presenta un sistema de medición de temperatura con etiqueta de tiempo (*timestamp*) utilizando un reloj de tiempo real (RTC) y almacenamiento de datos en memoria SD basado en tecnología Arduino, el cual se planea utilizar en un satélite de órbita baja. El principal objetivo de este sistema es ofrecer una alternativa más barata y sencilla para una sonda estratosférica, que permitirá validar sistemas para diseñar, posteriormente, un satélite de órbita baja.

## 2. Desarrollo

Para este proyecto se realizó el diseño e implementación de un primer prototipo en donde se utilizaron los siguientes materiales:

- Arduino DUE.
- Reloj en tiempo real DS1307.
- Módulo lector de tarjetas SD compatible con Arduino.
- Display LCD 16x2.

En figura 1 se puede observar la arquitectura del sistema con los bloques más importantes.

La tarjeta Arduino DUE utilizada es la primera tarjeta que cuenta un Microcontrolador de núcleo ARM de 32 bits Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 a 84 Mhz, lo cual mejora las capacidades estándar de Arduino. Dentro de sus principales características cuenta 12 pines de entrada/salida digitales, 12 entradas



analógicas de 12 bits de resolución, dos módulos para comunicación I2C y una cabecera para comunicación SPI (figura 2) [7].

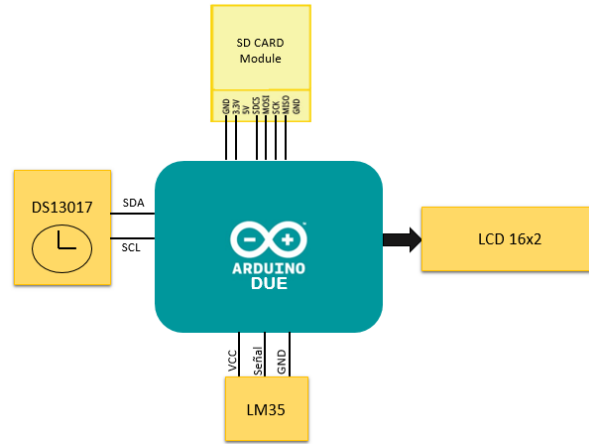


Figura 1 Arquitectura del sistema de adquisición de datos.

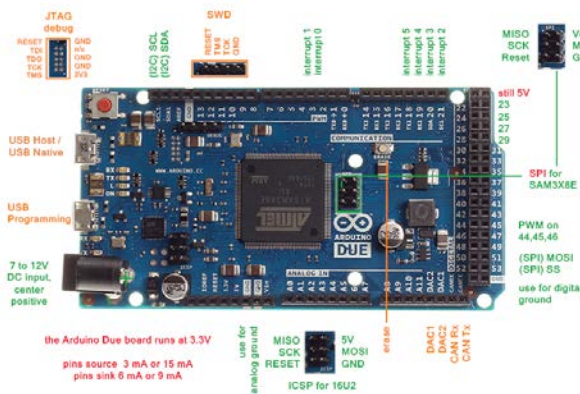


Figura 2 Tarjeta Arduino DUE.

El código implementado en la tarjeta Arduino DUE permite la comunicación y configuración de un reloj en tiempo real DS1307 Real-Time-Clock [8], el cual es un circuito integrado de ocho terminales con líneas de conexión a un bus I2C [9]. El DS1307, es un reloj/calendario en tiempo real que proporciona segundos, minutos, horas, día, mes y año. El final de fecha de mes se ajusta automáticamente durante meses menores de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El DS1307 tiene incorporado un circuito de sensor de tensión que detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería de respaldo.

También se realizó la lectura de un sensor de temperatura LM35 [10], el cual cuenta con una precisión calibrada de 1 °C y un rango que abarca desde -55 a +150 °C, una de las características más importantes es que tiene un comportamiento lineal, en donde cada 10 mV equivale a 1 °C.

Finalmente, los datos obtenidos del reloj DS1307 y el sensor LM35 son almacenados en una memoria SD a través de un módulo lector de tarjetas SD compatible con Arduino. Además la plataforma de Arduino cuenta con una librería para trabajar con este módulo en donde se hace uso del bus de comunicación SPI.

El código implementado en la tarjeta Arduino DUE se puede observar en el diagrama de flujo mostrado en figura 3.

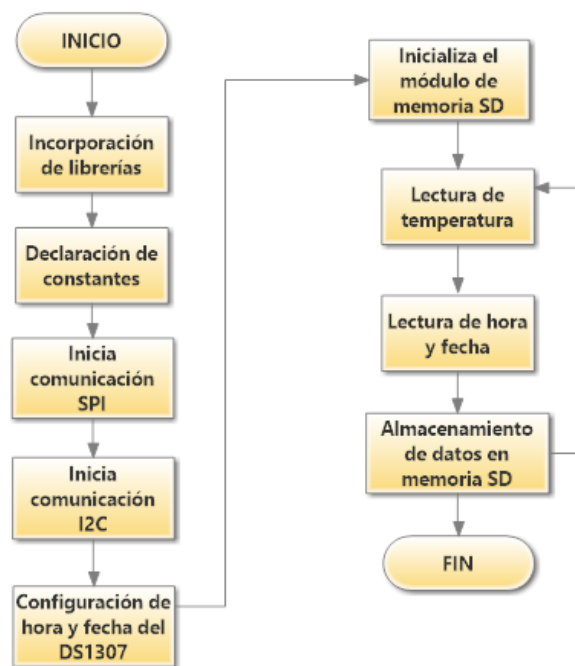


Figura 3 Diagrama de flujo de código implementado en la tarjeta Arduino DUE.

Las librerías que ofrece Arduino para la comunicación SPI, I2C, así como librerías para el módulo SD y el LCD facilitan su programación. Una lista de las librerías utilizadas se puede observar a continuación:

- “Wire.h”; Librería para el manejo del protocolo de comunicación I2C.
- “LiquidCrystal.h”; Librería para controlar un LCD 16x2.

- “RTCdue.h”; Librería para el reloj de tiempo real DS1307, específicamente para la tarjeta Arduino DUE.
- “SPI.h”; Librería para el manejo del protocolo de comunicación SPI.
- “SD.h”; Librería para el control del módulo SD Card.

Para la conexión del módulo SD se usaron los pines directamente del módulo SPI que se encuentra al centro de la tarjeta Arduino DUE (figura 4).

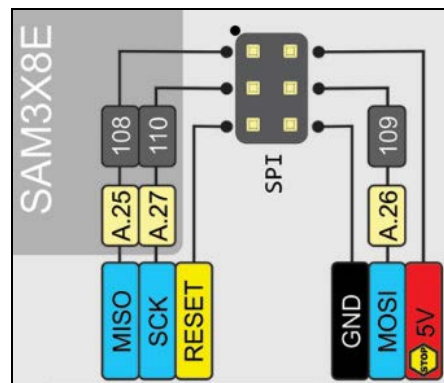


Figura 4 Configuración de pines para el módulo SPI en Arduino DUE.

A diferencia de otros Arduinos la tarjeta Arduino DUE no cuenta con un pin asignado a la terminal CS “*Chip select*”, necesario para la comunicación SPI, por ello se debe especificar en el código cuál pin se va a utilizar. Los posibles pines a los que se les puede asignar esta función son: 4, 10 o 52. Para ello se necesita declarar el pin a utilizar dentro del “*Set up*” (figura 5).

```
//Declaración del pin 10 como Chip Select  
SPI.begin(10);
```

Figura 5 Asignación del pin 10 como *Chip select*.

Para conectar el módulo SD a la tarjeta Arduino DUE fue necesario realizar un divisor de voltaje para la conexión de pines (figura 6), de manera que fuera posible pasar de 5 V, que proporciona el módulo SPI, a 3.3 V, que requiere el módulo de SD.

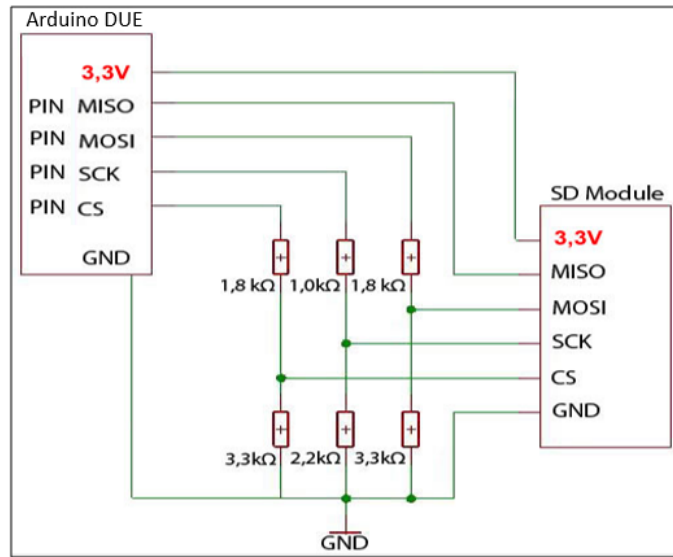


Figura 6 Divisor de voltaje para conexión de pines del módulo SD.

Además de utilizar la librería RTC, que sirve para configurar diferentes parámetros en el reloj DS1307 hecha específicamente para la tarjeta Arduino DUE, fue necesario agregar un par de líneas al código dentro del “*Void setup ()*” para asegurar que la comunicación I2C se configura de una manera correcta (figura 7), ya que sin estas líneas el protocolo de comunicación I2C no funciona correctamente con Arduino DUE.

```
#ifndef AVR
Wire.begin();//Se inicializa comunicacion i2c
#else
Wire1.begin(); // Shield I2C pins connect to alt I2C bus on Arduino Due
#endif
```

Figura 7 Líneas necesarias para establecer la comunicación I2C con el Arduino DUE.

El módulo del reloj DS1307 incluye una batería de 3 V para respaldo en caso de desconexión de la alimentación principal (figura 8). Este módulo presenta un problema para la tarjeta Arduino DUE, ya que las terminales SDA y SCL del módulo están conectadas a unas resistencias de *Pull-Up* a 5 V, al igual que la alimentación del circuito integrado, mientras que el voltaje máximo en los pines de I/O de Arduino DUE es de 3.3 V.

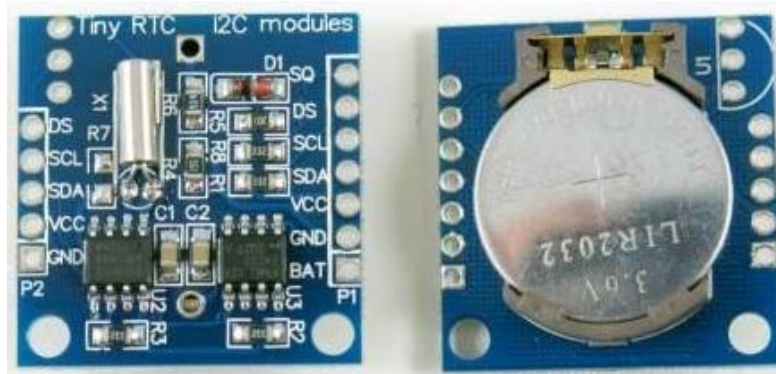


Figura 8 Módulo DS1307.

Para no dañar la tarjeta se revisó un diagrama esquemático del módulo DS1307 (figura 9) para ubicar las resistencias de *Pull-Up* que están conectadas a 5V. Una vez ubicadas las resistencias de *Pull-Up* en el módulo DS1307 se desoldaron y se remplazaron por un par de cables, de manera que fuera posible conectar unas resistencias de 10 k $\Omega$  a 3.3 V (figura 10), de esta manera no se dañará la tarjeta Arduino DUE.

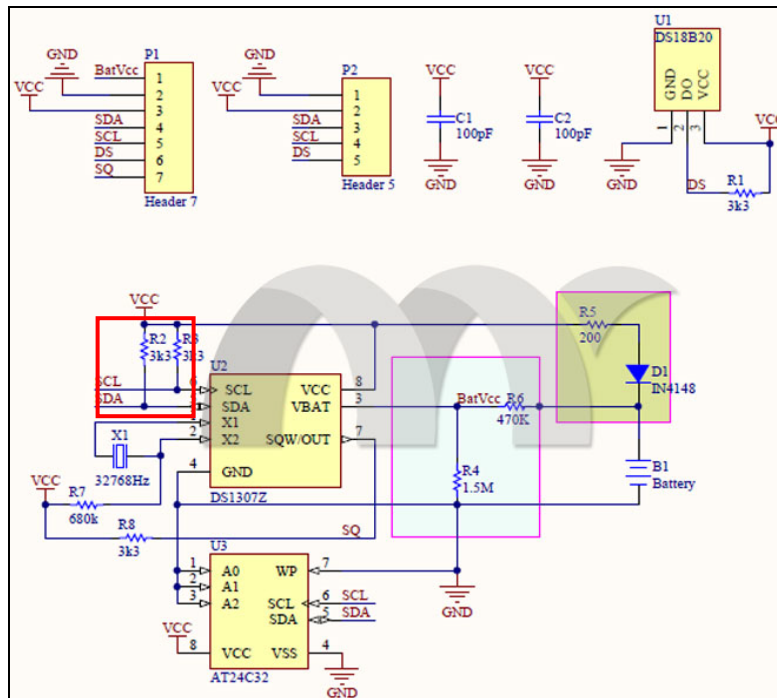


Figura 9 Diagrama esquemático del módulo DS1307.

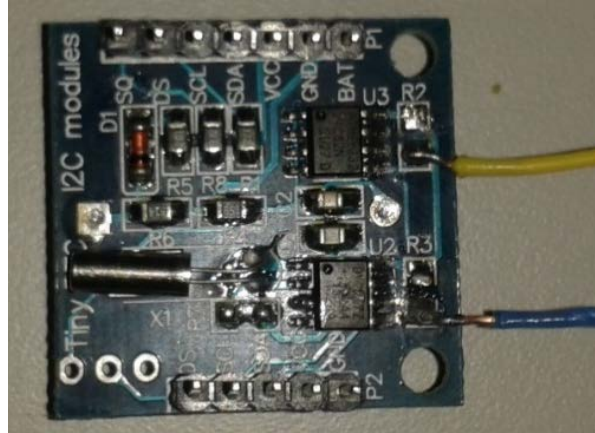


Figura 10 Módulo DS1307 modificado.

Para realizar la lectura de temperatura con el sensor LM35 se utilizó uno de los ocho convertidores ADC que dispone la tarjeta Arduino DUE, los cuales son de 12 bits de resolución por lo que nos entregarán valores desde 0 hasta 4095, en rangos de 0 a 3.3 V.

Para saber qué temperatura está midiendo el sensor es necesario conocer cuántos volts se están leyendo en la entrada analógica, por lo que se realizó la operación mostrada en ecuación 1.

$$X = \frac{\text{Dato} \times 3.3\text{v}}{4095} = V_{out} \quad (1)$$

Por lo tanto, para saber la cantidad de grados centígrados que representa dicho voltaje se realiza la operación mostrada en ecuación 2.

$$^{\circ}\text{C} = \frac{\text{Dato} \times 330}{4095} \quad (2)$$

Dado que la fórmula final tiene operaciones básicas, se pudo incluir en el código sin problemas.

### 3. Resultados

La figura 11 muestra el primer prototipo realizado en un protoboard. Una vez compilado el código se descargó a la tarjeta Arduino DUE y se comprobó su funcionamiento como se puede observar en las figuras 12 a 15.



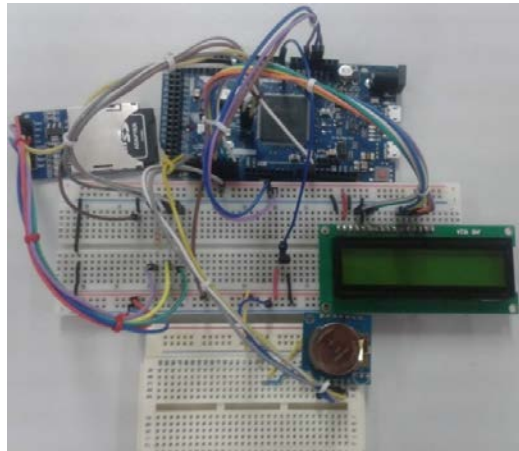


Figura 11 Conexión del primer prototipo.



Figura 12 Mensaje "Bienvenido, ITC Celaya".



Figura13 Mensaje "Inicializando SD".

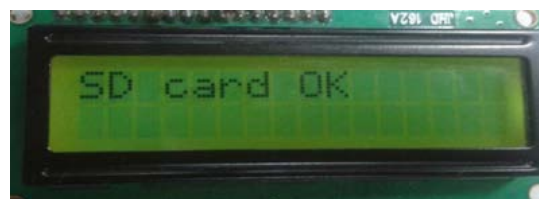


Figura 14 Mensaje "SD card ok".

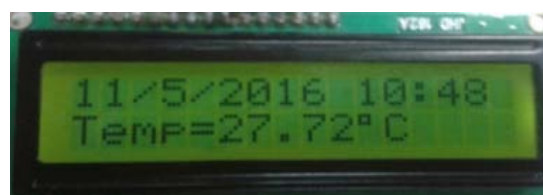


Figura 15 Temperatura y tiempo.

Los mensajes observados en la LCD 16x2 también pueden ser monitoreados a través del monitor serial del programa Arduino IDE. En este monitor también se puede observar que la hora y fecha de las mediciones fueron sincronizadas con la hora y fecha de compilación (figura 16).

Finalmente, después de que el sistema realizará diversas mediciones de temperatura se comprobó que la memoria SD almacenó correctamente los datos (figura 17). Este módulo soporta una memoria de hasta 2GB, lo que permite registrar aproximadamente 45 millones de lecturas de temperatura con su etiqueta de tiempo.

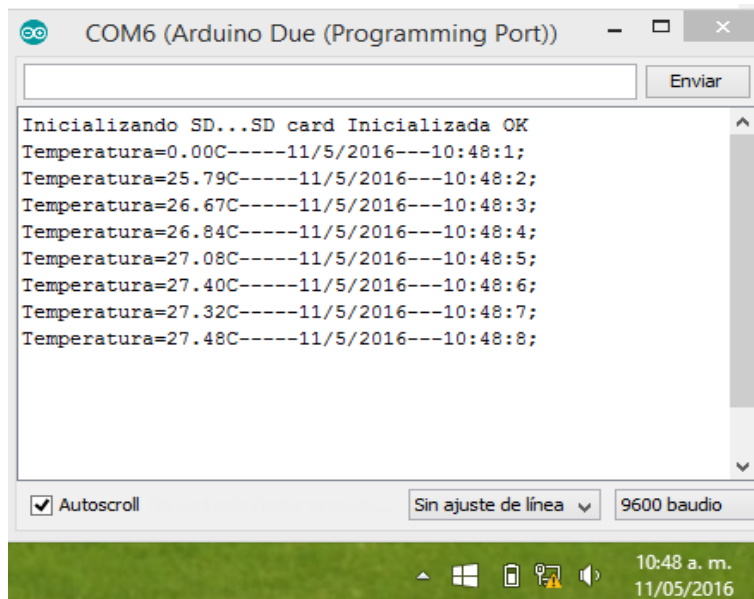


Figura 16 Mensajes en el monitor serial de Arduino.

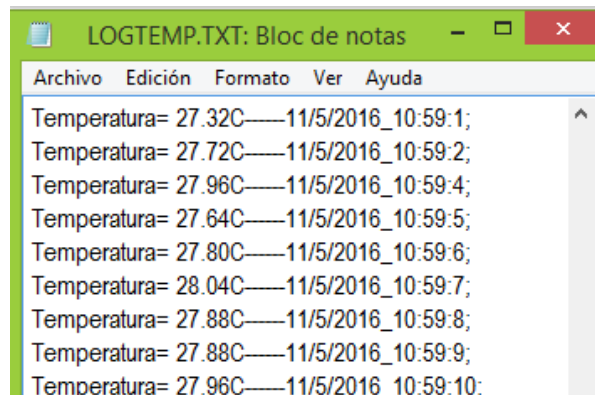


Figura 17 Contenido de memoria SD.



Como se puede observar el código final solo ocupa un 9% de del espacio disponible en la tarjeta (figura 18). Esto permitirá en un futuro incluir más funciones de medición y procesamiento en el dispositivo.

```
Subido
El Sketch usa 50,224 bytes (9%) del espacio de almacenamiento de programa. El máximo es 524,288 bytes.
Atmel SMART device 0x285e0a60 found
Erase flash
done in 0.032 seconds
```

Figura 18 Cantidad de recursos utilizados en la tarjeta Arduino DUE.

Las mediciones de temperatura del sensor LM35 se compraron con las mediciones realizadas con un termómetro de mercurio en un baño térmico, en donde se registraron las mediciones cada 60 segundos (figura 19).

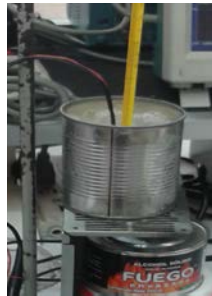


Figura 19 Sensor LM35 y termómetro en baño térmico.

Los datos obtenidos del experimento anterior se muestran en la figura 20. Se obtuvo un error promedio de 2.71%.

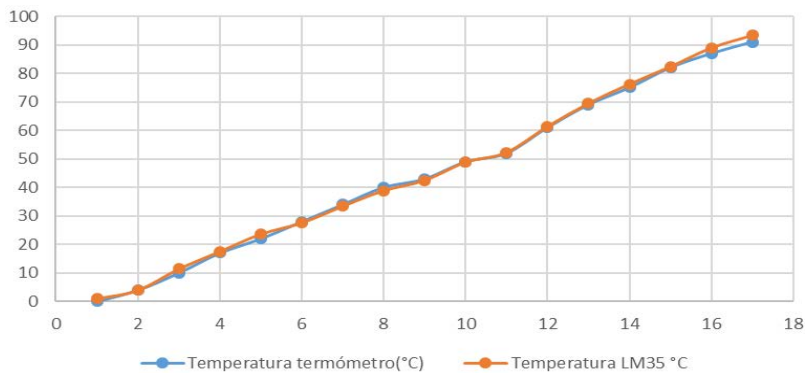


Figura 20 Comparación de lecturas entre termómetro de mercurio y LM35.

## **4. Discusión**

El desarrollo de proyectos en la plataforma de Arduino tiene la ventaja de ofrecer una solución barata en comparación con otras plataformas de programación más sofisticadas, sin embargo, para este proyecto los recursos que ofrece la tarjeta Arduino DUE, así como las librerías utilizadas, fueron suficientes para llevar a cabo un primer prototipo funcional que puede ser utilizado en pruebas iniciales con satélites de baja altura.

Con el desarrollo de este proyecto es posible implementar un sistema de medición de temperatura con etiqueta de tiempo y almacenamiento, todo en tiempo real utilizando una tarjeta y componentes de bajo costo. Otra ventaja del sistema propuesto es que las mediciones capturadas y almacenadas ocupan muy poco espacio dentro de la memoria SD de 2 GB, por lo que se podrían tener millones de mediciones que pueden ser útiles para el análisis de resultados.

Es importante mencionar que el microcontrolador AT91SAM3X8E que incluye la tarjeta Arduino DUE, trabaja en un rango de temperatura de -40 a 85 °C, lo cual será muy importante al momento de realizar las primeras pruebas en un satélite de baja altura, ya que la temperatura en la estratósfera aumenta progresivamente desde los -55 °C hasta alcanzar los 0 °C, por lo que deberán realizarse pruebas para comprobar el desempeño de la tarjeta bajo estas condiciones.

Otro aspecto importante a considerar es el sensor utilizado para medir temperatura, ya que de momento se está utilizando un sensor LM35, pero en futuras pruebas se espera utilizar una sonda térmica 107L.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se demostró que se puede implementar un sistema de medición de temperatura, con referencia de un reloj en tiempo real con almacenamiento en memoria SD en una plataforma comercial como Arduino DUE. Esta plataforma permite una reducción considerable de los costos que implican este tipo de pruebas para mediciones de diferentes variables en la estratósfera.

Antes de realizar pruebas reales en un satélite de órbita baja, será necesario hacer pruebas de desempeño del sistema a baja temperatura y presión. Con estas

pruebas se podrá observar su comportamiento ante condiciones semejantes a las que se encuentran en la estratósfera. De esta manera se podrá comprobar si es viable, o no, implementar este tipo de sistemas con tarjetas Arduino, ofreciendo una alternativa mucho más barata en comparación a los sistemas convencionales. Estas pruebas se realizarán en una cámara de termovacío del Centro de Investigaciones Nucleares de la UNAM en meses próximos.

Entre las funciones futuras a incluir en el sistema están la medición de ozono, la obtención de imágenes, y la medición con sonda térmica 107L.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Astronomía educativa. <http://www.astromia.com/tierraluna/capatmosfera.htm>. Abril 2016.
- [2] D. W. Fahey, "20 preguntas y respuestas sobre la capa de Ozono". Evaluación Científica del Agotamiento de Ozono. 2002. Pp. 1-7.
- [3] El-Bayoumi, Abdullah, "A new Checkout-and-Testing-Equipment (CTE) for a satellite Telemetry using LabVIEW". Aerospace Conference. IEEE. 2015. Pp. 1-9.
- [4] Interorbital Systems, Satellite kits. [http://www.interorbital.com/interorbital\\_06222015\\_030.htm](http://www.interorbital.com/interorbital_06222015_030.htm). Agosto 2016.
- [5] Ayyaz, M. Naeem, M. Riaz Suddle, Shakeel Zahid, "Systems design of an economical and general-purpose on-board computer for low-earth-orbit micro-satellites". Second International Conference on. IEEE. 2008. Pp. 1-9.
- [6] TubeSat kit specifications and pricing, version 2.0, Interorbital System. Mojave Air & Space Port California. Estados Unidos. 2013.
- [7] McRoberts, M. Levy, B. Wootton, *Beginning Arduino*. 2010. Apress. New York.
- [8] DS1307 64 x 8 Serial I2C Real-Time Clock. Maxim Integrated Products, Sunnyvale, CA. USA. 2015.
- [9] F. Leens, "An introduction to I2C and SPI protocols". Instrumentation & Measurement Magazine. IEEE. Vol. 2. 2009. Pp 8-13.

[10] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor. Texas Instruments. Dallas, Texas, USA. 2016.

## **7. Autores**

Miguel Angel Silva García. Estudiante de 9° semestre de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Alejandro Espinosa Calderón. Recibió su título de Doctorado de la Universidad Autónoma de Querétaro, en Querétaro, Qro., Mex., en 2012, de donde honores, la medalla al mérito académico, y el premio a la mejor tesis doctoral. Ha participado en eventos científicos internacionales en EEUA, Italia y China. Ha recibido premios internacionales de la OSA y USAID, ambos de EEUA. Desde 2013 trabaja en el Departamento. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Sus áreas de interés incluyen: instrumentación electrónica y procesamiento en sistemas digitales.

Dr. Mario Alberto Mendoza Bárcenas. Obtuvo su título de Doctor en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente se desempeña como investigador en la coordinación de Fomento al Desarrollo de la Industria Nacional del Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional. Trabaja en proyectos multiinstitucionales y multidisciplinarios de desarrollo de instrumentación para vehículos aeroespaciales.

M.I. Lauro Santiago Cruz. Obtuvo su título de Maestro en Electrónica en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Actualmente se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería - UNAM y desarrolla proyectos de investigación aplicada en la Coordinación de Electrónica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

M.I. Rafael Prieto Meléndez. Recibió el título Maestro en Ingeniería, en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1999. Es profesor de asignatura definitivo en la División de Ciencias Básicas y profesor de asignatura en la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus líneas de trabajo comprenden: Sistemas Embebidos basados en Microcontroladores y FPGA; y Modelado y Simulación de Sistemas.

Dr. José Alfredo Padilla Medina. Recibió su grado de Doctor en Filosofía del Centro de Investigaciones en Óptica, en León, Gto., Mex., en 2003. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en el Dpto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores con nivel I. Sus áreas de interés incluyen: procesamiento de imágenes digitales en el visible e infrarrojo, el sistema visual humano, y la lógica difusa.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

# **SISTEMA DE MONITOREO PARA EL ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE LA LAGUNA DEL CARPINTERO**

***Julio Laria Menchaca,***

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"  
*jlaria@uat.edu.mx*

***Salvador Ibarra Martínez***

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"  
*sibarram@uat.edu.mx*

***José Antonio Castan Rocha***

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"  
*jacastan@uat.edu.mx*

***Emilio Castan Rocha***

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería "Arturo Narro Siller"  
*ecastan@uat.edu.mx*

## **Resumen**

Una de las características más importantes de los estuarios o lagunas, es la interacción entre el agua dulce y la de mar. La dinámica de estos es afectada por las mareas, el oleaje, el viento, la precipitación pluvial, la evaporación, los flujos de agua dulce y el transporte de sedimentos. El estudio de la hidrodinámica en estos ecosistemas es uno de los aspectos más importantes que se necesitan para crear las bases necesarias para una correcta y debida planeación en diseño de obras de infraestructura turística y social. Por tal motivo en el presente trabajo se desarrollo un sistema de monitoreo con la finalidad de comenzar a generar una base de datos de gran importancia para poder realizar un estudio hidrodinámico de la Laguna del Carpintero, situada en el centro de la ciudad de Tampico. El sistema está compuesto por un mareógrafo ultrasónico que permite el monitoreo en tiempo real del nivel del agua con una exactitud de  $\pm 7\text{mm}$  y de su temperatura con una

resolución de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ .

**Palabra(s) Clave(s):** limnógrafo, mareógrafo, radio frecuencia, ultrasonido.

## 1. Introducción

Los estuarios o lagunas son complejos y fascinantes ambientes naturales en cuyas márgenes se sitúan los mayores asentamientos humanos. Estas zonas son extremadamente valiosas desde el punto de vista ambiental y socioeconómico.

Son diversas las definiciones de un estuario que han sido creadas en función de su naturaleza geográfica, o de sus procesos físicos, biológicos, químicos y socioeconómicos. Son varias las definiciones existentes para un estuario. Para este trabajo utilizaremos la definición propuesta por [1], que define a un estuario como un cuerpo costero semicerrado de agua que tiene una conexión libre con el mar, que se extiende a lo largo del río hasta el límite de la influencia de la marea, y donde el agua de mar es diluida con el agua dulce procedente de masas de agua continentales. La dinámica de estos es afectada por las mareas, el oleaje, el viento, la precipitación pluvial, la evaporación, los flujos de agua dulce y el transporte de sedimentos. El balance entre todos estos procesos determina las características imperantes en cada laguna [2, 3].

Por tanto, el estudio de la hidrodinámica en estos ecosistemas es uno de los aspectos más importantes que se necesitan para crear las bases necesarias para una correcta y debida planeación en diseño de obras de infraestructura turística y social, además es complemento para llevar a cabo algunos estudios biológicos y químicos en la laguna [4, 5].

Entre los parámetros más importantes a medir para poder realizar un estudio hidrodinámico están el nivel del agua de la laguna y su variación en relación con las mareas. Para la medición del nivel del agua en los estuarios como consecuencia de las mareas se utilizan los mareógrafos o limnógrafos. Según el fenómeno utilizado para realizar la medida del nivel del agua, se pueden distinguir tres tipos fundamentales de mareógrafos [6, 7]:

- *Mareógrafo de flotador*, consiste de un cilindro introducido en el agua. Este cilindro contiene varios orificios en su base que el movimiento hacia

adelante y atrás del agua asociado al oleaje inducido por el viento y otras ondas de períodos cortos no puede pasar a través de él; solamente el cambio lento del nivel del agua asociado a la marea puede entrar en el pozo. Este cambio del nivel del agua es recogido por un flotador y registrado por lo general en papel o como el caso del propuesto por Peng[8] donde digitalizan la posición del flotador. Sin embargo, estos mareógrafos requieren una instalación algo laboriosa y son poco prácticos lejos de la orilla.

- *Mareógrafo Aanderaa*, llamados también mareógrafos de presión, obtienen el nivel del agua a partir de la medida de la presión hidrostática. Esta medida se obtiene anclando el medidor de presión en el fondo del mar o laguna. Un inconveniente de este tipo de medidor es que la información se va almacenando en una memoria y no es hasta que se descargue dicha información que se conoce el comportamiento del nivel del agua o sea no brindan información en tiempo real.
- *Mareógrafo Sonar*, estos son los más recientes y está compuesto por un emisor - receptor de ultrasonido colocado a una distancia de la superficie del agua y mediante la medición del tiempo que tarda en llegar el eco de una señal que ha mandado se determina la distancia recorrida y se traduce a nivel de agua. Sobre estos mareógrafos existe en la actualidad varios desarrollos donde se destacan los propuestos por [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] en todos ellos envían la señal de manera inalámbrica y utilizan electrónica desde microprocesadores, DSP y hasta circuitos más complejos.

La zona sur del Estado de Tamaulipas se caracteriza por un variado número de sistemas laguneros en los cuales, se deberían estar monitoreando de manera permanente y sistemática, los distintos parámetros de calidad del agua y meteorológica como: mareas, corrientes, temperaturas del agua, salinidad, turbidez, pH, oxígeno, así como presión barométrica, viento temperatura ambiente. Además, estudios limnológicos que nos permita conocer las características del



agua y conocer su capacidad de regeneración natural o mecánico, sin embargo esto no se hace en la actualidad.

Entre estas lagunas se encuentra la Laguna del Carpintero (ver espacio cerrado en contorno de color rojo figura 1) situada en la zona centro de la ciudad de Tampico. La laguna tiene conexión mediante el Canal de la Cortadura con el río Pánuco, localizado a unos 7 km, aguas arriba de su desembocadura, dicha laguna posee una profundidad media de 1.2 metros. Esta abarca un espacio de aproximadamente 90 hectáreas, en pleno corazón de la ciudad, y no obstante estar sometido a una constante presión urbana, posee una variedad de flora y fauna.

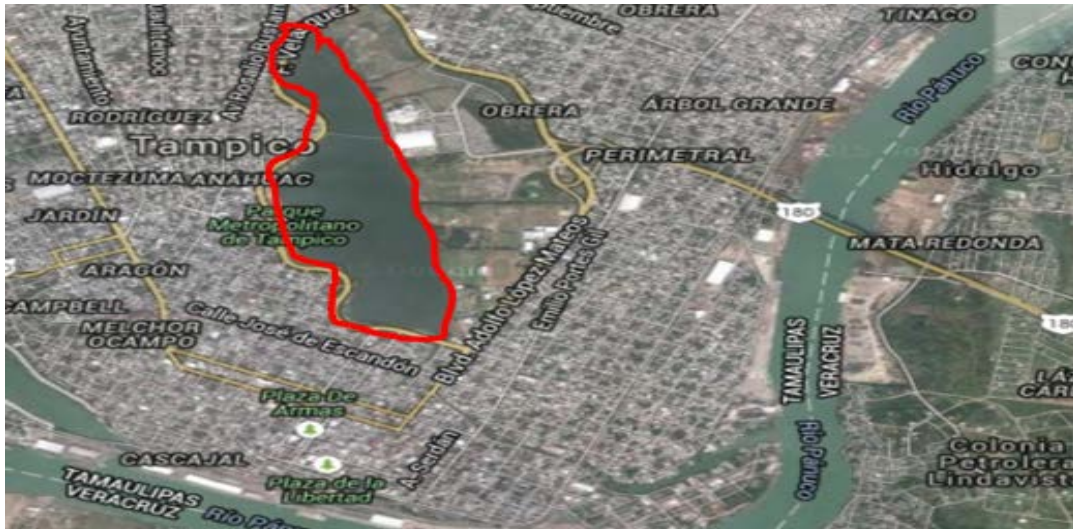


Figura 1 Vista satelital de la laguna del Carpintero.

En este contexto, y dada la importancia que tiene la Laguna del Carpintero desde el punto de vista ambiental, socioeconómico y cultural para la ciudad de Tampico, es que en el presente trabajo se muestra el desarrollo de un sistema para el monitoreo en tiempo real del nivel y temperatura del agua, con la finalidad de comenzar a generar una base de datos de gran importancia para poder realizar un estudio hidrodinámico de la laguna y así conocer también el estado que guarda de manera espacial y temporal este cuerpo de agua. El sistema se desarrolló utilizando componentes de bajo costo y de fácil adquisición y de tal manera que

permite agregarle la medición de otros parámetros como la velocidad y dirección de corriente, propiedades físico-químicas y biológicas, que nos permitan crear un proyecto de reestructuración de este cuerpo de agua de importancia para la ciudad de Tampico.

## 2. Desarrollo

El sistema de monitoreo hidrográfico desarrollado está compuesto por dos mareógrafos ultrasónicos. Uno de los mareógrafos se instaló cerca de la conexión de la laguna con el canal de la Cortadura con el cual tiene su conexión con el río Pánuco (ver punto 1 en la figura 2) y el segundo mareógrafo se instaló en el otro extremo de la laguna (ver punto 2 en la figura 2).

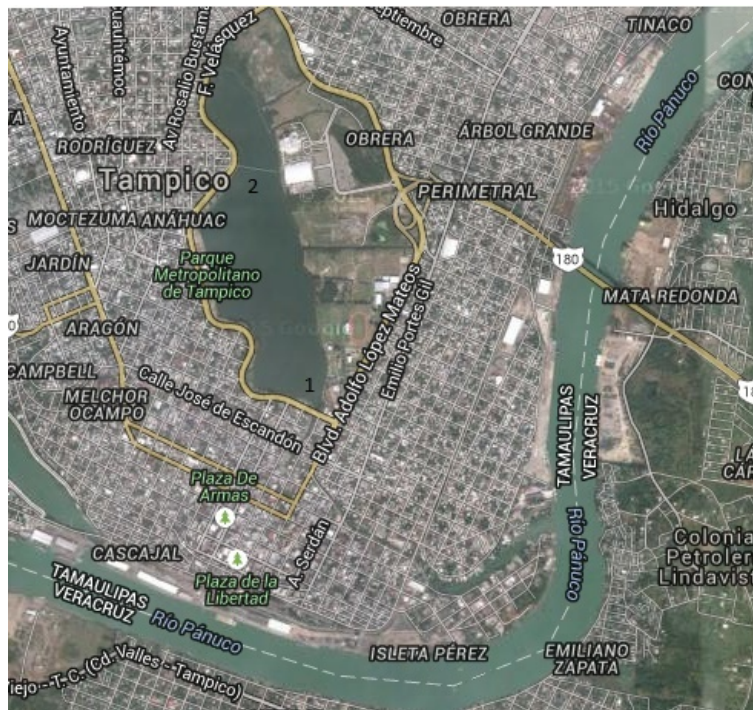


Figura 2 Distribución de los puntos de monitoreo en el interior de la laguna.

La diferencia del mareógrafo desarrollado en relación con los existentes en el mercado es que en el desarrollo del mismo se utilizaron módulos electrónicos de fácil acceso en el mercado y de bajo costo.

El mareógrafo se desarrolló en base a un sensor ultrasónico de bajo costo. La mayoría de los sensores de ultrasonido de bajo costo se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido cuyo lóbulo, o campo de acción, es de forma cónica.

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción de eco se puede establecer la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la ecuación 1 [17].

$$d = \frac{1}{2} V t \quad (1)$$

Donde  $V$  es la velocidad del sonido en el aire y  $t$  es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

A pesar de que su funcionamiento parece muy sencillo, existen factores inherentes tanto a los ultrasonidos como al mundo real, que influyen de una forma determinante en las medidas realizadas. Entre estos factores el más determinante es la densidad del medio material por donde se mueven las ondas ultrasónicas que en este caso es el aire. La densidad del aire depende a su vez de la temperatura influyendo este factor sobre la velocidad de propagación de la onda según la ecuación 2.

$$V_s = V_{s0} [1 + (T/273)]^{1/2} \quad (2)$$

Siendo  $V_{s0}$  la velocidad de propagación de la onda sonora a  $0^\circ\text{C}$ , y  $T$  la temperatura absoluta (en grados Kelvin).

Realizando varias transformaciones obtenemos la ecuación 3.

$$d = (0.1658 + 0.0003 T) t \quad (3)$$

Siendo  $d$  la distancia en milímetros, a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora;  $T$  la temperatura del aire dentro del tubo de PVC, en  $^\circ\text{C}$  y  $t$  el tiempo en microsegundos, transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

En la figura 3 se muestra el esquema en bloques del sistema de monitoreo. El mismo está constituido por un módulo electrónico y un módulo de adquisición el cual recibe la señal del módulo electrónico mediante módems de radiofrecuencias.

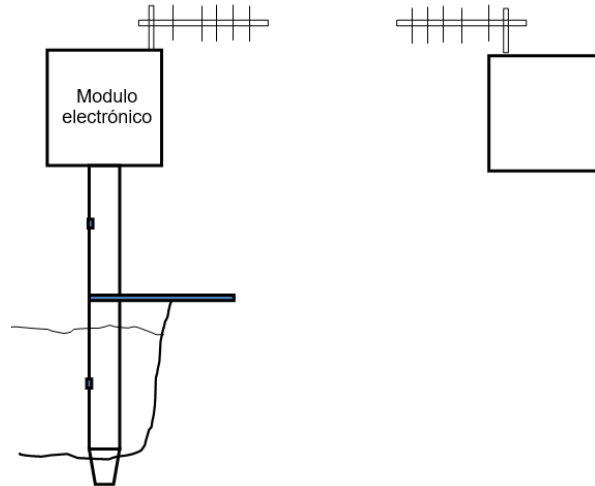


Figura 3 Esquema en bloques del sistema de monitoreo.

El módulo electrónico está conectado en la parte superior de un tubo de PVC de 160 mm de diámetro el cual va anclado al fondo de la laguna. Este contiene en su parte inferior cuatro huecos de 50 mm x 50 mm de tamaño para permitir el paso del agua a su interior y que permita a su vez seguir el nivel del agua que hay en el exterior del mismo. El módulo electrónico contiene tres sensores, un emisor y receptor ultrasónico que se utiliza para medir el nivel del agua, un sensor de temperatura que permite medir la temperatura del agua y otro sensor de temperatura para la compensación del valor de la velocidad del sonido. Estos van conectados a una tarjeta multifunción la cual envía de forma inalámbrica a través de un modem de radiofrecuencia, los valores del nivel del agua y su temperatura al módulo de adquisición.

El módulo de adquisición está constituido por una computadora la cual recibe a través de un modem de RF los datos de las señales del módulo electrónico, los almacena en su memoria y envía también los datos registrados por correo electrónico cada cierto periodo de tiempo.

### 3. Resultados

En la figura 4 se muestra el esquema en bloque de los circuitos que componen el módulo electrónico. El mismo se diseñó en base a una tarjeta multifunción modelo Arduino Uno. Esta tarjeta contiene un microcontrolador ATmega328 y

entre sus principales características tenemos: 14 entradas/salidas digitales, de las cuales 6 pueden ser utilizadas como salidas PWM, 6 entradas analógicas de 10 bits de resolución con un rango de voltaje entre 0 y 5 V, una interface serial, un cristal oscilador de 16 Mhz, conexión USB, conector de alimentación para nivel de voltaje desde 7 hasta 12 V, memoria Flash de 32 KB, memoria EEPROM de 1 KB, memoria SRAM de 2 KB [18].

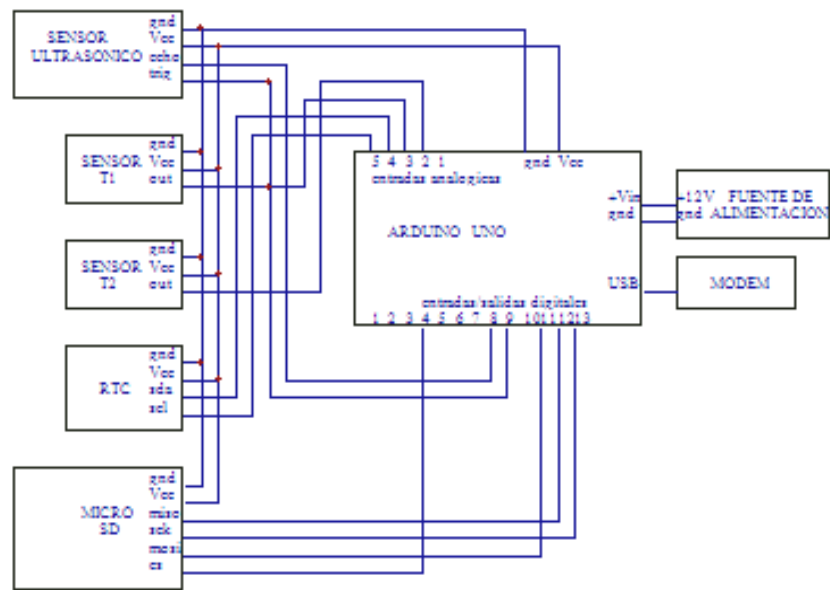


Figura 4 Circuito del módulo electrónico.

A la tarjeta Arduino Uno están conectados el sensor ultrasónico modelo HC-SR04, que permite medir el nivel del agua con una resolución de  $\pm 7\text{mm}$ ; el sensor de temperatura T1 modelo LM 35 para medir la temperatura del aire en el interior del tubo de PVC, el sensor de temperatura T2 para medir la temperatura del agua, ambos con una resolución de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Además, están conectado un circuito de reloj de tiempo real modelo Tiny RTC que se utiliza para monitorear la fecha y hora y un circuito con interface para una memoria micro SD, para el almacenamiento de los datos.

La tarjeta Arduino funciona en base a un programa escrito en C++ que permite la lectura del nivel de agua y de la temperatura cada 5 segundos, almacenando esos valores en la memoria micro SD junto con la fecha y hora de lectura. El programa

calcula además, el promedio de 12 mediciones, realizadas cada 5 segundos lo que hace un total promedio en tiempo de 1 minuto y lo envía a través del modem de RF al módulo de adquisición.

Como modem de RF se utilizó un XBee-Pro 900 conectado con la tarjeta Arduino a través de una interface que se encarga de la conversión de los niveles de voltajes de las señales. Este módulo está programado para trabajar como transmisor y es ideal para aplicaciones punto a punto y punto a multi punto, así como para aplicaciones que requieren transmisión a grandes distancias ya que con sus 50 mW de potencia de transmisión puede abarcar distancias desde 500 m en interiores hasta 1.6 km en exteriores.

El módulo electrónico se alimenta con +12 V que lo proporciona una fuente de alimentación en base a una batería la cual puede cargarse a través de una celda fotovoltaica o a través de la red eléctrica según sea el caso.

El módulo de adquisición está constituido por modem de RF modelo XBee-Pro 900 conectado a través de una interface para USB a una computadora y está programado para trabajar como receptor. En la computadora hay un programa escrito en LabVIEW el cual utiliza un algoritmo programación gráfico. Este brinda un panel frontal como el que se muestra en la figura 5 y un panel de programación.

En la ventana marcada con el número 1 en la figura 5 se escribe el nombre y ruta del archivo en el cual se almacenarán los datos que se reciban del módulo electrónico. El nombre del archivo deberá tener extensión .csv para que pueda ser abierto posteriormente en EXCEL. Las ventanas agrupadas con el número 3 en la figura 5, se utilizan para configurar el puerto donde está conectado el módulo de RF receptor. Las ventanas con los números 2, 4 y 5 respectivamente, muestran la fecha y hora así como el promedio de las 12 últimas mediciones últimas recibidas y almacenadas en el archivo del nivel y temperatura del agua.

Este programa también permite enviar por correo electrónico el archivo con las mediciones almacenadas. La dirección o direcciones de los destinatarios se editan en las ventanas agrupadas con el número 6 en figura 5. El correo se envía a través del servidor configurado en las ventanas agrupadas con el número 7 en



figura 5. En la ventana con el número 8 se selecciona cada cuantos minutos enviar el correo. Si se selecciona 60 minutos, durante 60 minutos se estará almacenando mediciones en el archivo seleccionado en la ventana 1 y al cabo de ese tiempo se envía, a las direcciones de correo configuradas en las ventanas con el número 6, el archivo con las mediciones almacenadas durante ese periodo de tiempo. Posteriormente el archivo se mantiene almacenado en la computadora y se comienza un nuevo archivo con el mismo nombre y en la misma ubicación pero con un número consecutivo.

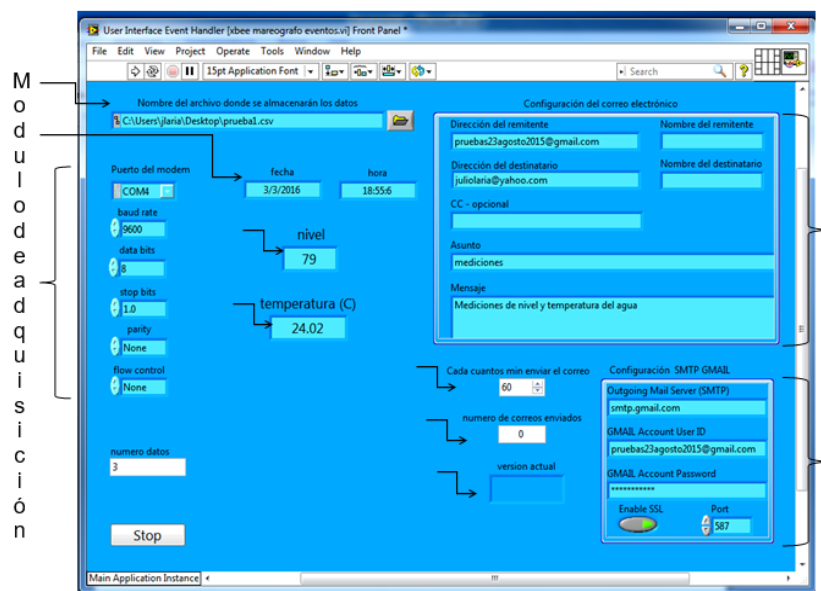


Figura 5 Panel frontal del programa del módulo de adquisición.

De esta manera se tiene en archivos, almacenadas las mediciones recibidas del módulo electrónico a parte de las almacenadas en la memoria SD que se localiza en el módulo electrónico.

En la ventana con el número 9 se va mostrando la cantidad de correos electrónicos enviados y en la número 10 la versión del correo actual en proceso.

#### 4. Discusión

Para comprobar el funcionamiento del sistema se realizó una prueba a nivel de laboratorio colocándose dentro del tubo de PVC una tapa a una distancia del

sensor de 423 mm y la temperatura en el laboratorio durante la prueba se mantuvo en los 30.4 °C. El tiempo de la prueba fue de 1 hora y los resultados obtenidos se muestran en la figura 6 para el nivel medido y en la figura 7 para la temperatura medida.

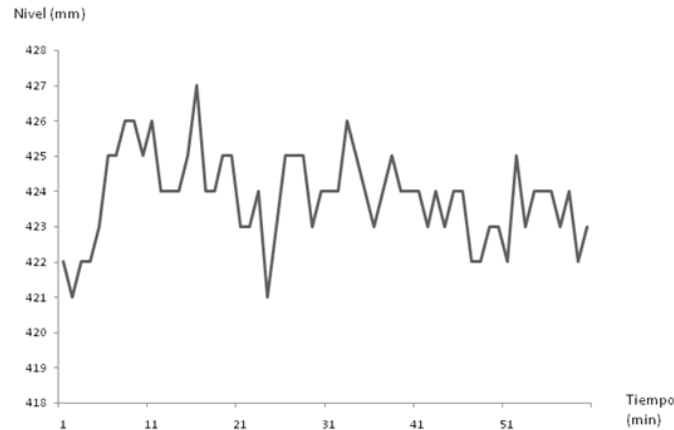


Figura 6 Comportamiento de la medición de nivel en el laboratorio.

El comportamiento de la medición de nivel en el laboratorio y mostrado en la figura 6 mostro una media de 423.8 mm y una desviación estándar de 1.27. Para el caso de la temperatura se obtuvo una media de 30.48°C y una desviación estándar de 0.12.

Actualmente el sistema se instaló en la Laguna del Carpintero y funciona correctamente.

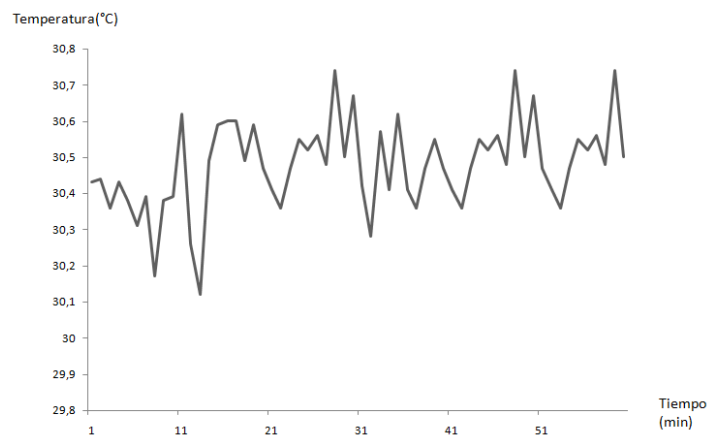


Figura 7 Comportamiento de la medición de la temperatura en el laboratorio.



## 5. Conclusiones

Como resultado del presente trabajo se obtuvo el desarrollo de un sistema de monitoreo compuesto por dos mareógrafos ultrasónicos que permiten el monitoreo en tiempo real del nivel del agua de la Laguna del Carpintero en la ciudad de Tampico, con una exactitud de  $\pm 7$  mm y de su temperatura con una resolución de  $\pm 0.5$  °C. El diseño del sistema permite agregar otros sensores por lo que puede ampliarse la cantidad de parámetros a medir en los puntos de monitoreo. El bajo costo de los componentes utilizados permite la reproducción del sistema para el monitoreo de otras lagunas y ríos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] R.D. Dyer, *Estuaries: A physical introduction*. Second ed. 1997. John Wiley and Sons. Pág. 195.
- [2] R.H. Freije, J. Marcovecchio, *Oceanografía química*, En: *Ecosistema del Estuario de Bahía Blanca*. 2004. M.C. Piccolo & M. Hoffmeyer eds. ISBN 987-9281-96-9, Bahía Blanca, Argentina. Pág. 233.
- [3] M.O. Hayes, "Morphology of sand accumulations in estuaries". *Estuarine Research*, Vol.2. 1975. Pp.3-22.
- [4] G.M.E. Perillo (1995) *Definitions and geomorphologic classifications of estuaries*, Chapter 2. En: *Geomorphology and sedimentology of estuaries*. *Developments in sedimentology* 53. 1995. Ed. G.M.E. Perillo. Elsevier Science. Pp 17- 47.
- [5] Martín, J. Padín, F. García, *Apuntes de Geodesia Física*. 2000. Editorial. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. Pág.181.
- [6] D. Pugh, T. Surges, *Mean Sea Level*.1996. Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. Pág. 472.
- [7] *Guide to Hydrological Practices Volume II*. Sexta Edición. 2008. WMO - No. 168. Suiza. ISBN 978-92-63-10168-6.
- [8] P. Xuange, L. Peipei, H. Chunying, *One Kind of Water Level Monitor Recording Instrument*. In: 978-1-4244-1718-6/08/IEEE. 2008.

- [9] N. Zachos, C. Kosmatopoulos, Th. Lions, "A Wireless Network of Remote Measuring Stations: Application in Water Level Monitoring". IEEE Catalog Number: 95TH8081.
- [10] S. Rachrnan, I. Pratomo, N. Mit, Design of Low Cost Wireless Sensor Networks- Based Environmental Monitoring System for Developing Country. Proceedings of APCC2008 copyright, IEICE 08 SB 0083. 2008.
- [11] S. Chen, C. Wu, "Ultrasonic Distance Measurement Based on Infrared Communication Technology". International Conference on Computer Application and System Modeling. In: 978-1-4244-7237-6/10/IEEE. 2010.
- [12] M. Zhang, S. Li, "A Method of the Untouched Ultrasonic Liquid Level Measurement With High Precision". International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM). 2010.
- [13] L. Zhang, L. Zhao, "Research of Ultrasonic Distance Measurement System Based on DSP". In: 978-1-4244-9763-8/11/IEEE. 2011.
- [14] G. Wang, C. Gu, J. Rice, T. Inoue, C. Li, "Highly Accurate Noncontact Water Level Monitoring using Continuous-Wave Doppler Radar". In:978-1-4673-3105-0/13/IEEE. 2013.
- [15] B. Panindrareddy, P. Eswaran, "Metro overhead tanks monitoring system using ZigBee based WSN", Proceedings of 2013 IEEE Conference on Information and Communication Technologies (ICT) In: 978-1-4673-5758-6/13/IEEE. 2013.
- [16] S. Maqbool, N. Chandra, "Real Time Wireless Monitoring and Control of Water Systems using Zigbee 802.15.4". 5th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks. In: 978-0-7695-5069-5/13 IEEE. 2013.
- [17] D. Pugh, Tides, Surges and Mean Sea Level! Ed. John Wiley and Sons, Wiltshire. 472 Pp. 1996.
- [18] Arduino. [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc). Febrero 2016.

## **7. Autores**

Dr. Julio Laria Menchaca obtuvo el grado de Doctor en Tecnología Avanzada en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, México. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Sus intereses de investigación incluyen el diseño electrónico, el control inteligente y la automatización de procesos

Dr. Salvador Ibarra Martínez obtuvo el grado de Doctor en Tecnologías de la Computación orientado a Robótica Cooperativa en la Universidad de Girona, España. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus intereses de investigación incluyen los sistemas de agentes inteligentes, mecanismos de coordinación para robots autónomos móviles para su aplicación tanto en simulación como en plataformas reales, particularmente en el fútbol robótico y los sistemas inteligentes de transporte.

M.C. José A. Castán Rocha recibió el grado de Maestro en Ciencias en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Actualmente es estudiante en el programa doctoral de Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Actualmente es profesor de la Facultad de Ingeniería “Arturo Narro Siller” de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Sus intereses de investigación están relacionados con los Sistemas Inteligentes de Transportes, Modelos para el Flujo de Vialidades y su implementación con los Agentes Inteligentes.

M.C. Emilio Castán Rocha recibió el grado de Maestro en Ciencias en el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero en el cual actualmente se desempeña como Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Sus intereses de investigación están relacionados con las áreas de control inteligente y sistemas electrónicos.

# DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA MONITOREO DE TEMPERATURA Y CONTROL DE HUMEDAD DE PLANTAS

***Ander Osvaldo Manjarrez Carrillo***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

[anderosvaldo\\_19@hotmail.com](mailto:anderosvaldo_19@hotmail.com)

***Juan Manuel Banda Chávez***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

***Laura Yaremith Damián Padilla***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

***Luz María Rodríguez Vidal***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

***Omar Francisco Peraza Arjona***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

***Juan Pablo Serrano Rubio***

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato (ITESI)

[juserrano@itesi.edu.mx](mailto:juserrano@itesi.edu.mx)

***Rafael Herrera Guzmán***

Centro de Investigación en Matemáticas A.C. (CIMAT)

[rherrera@cimat.mx](mailto:rherrera@cimat.mx)

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño e implementación de un dispositivo llamado “Unidad de Procesamiento de Temperatura y Control de Humedad” (UPTeCH) para monitorear la temperatura del ambiente y la humedad del subsuelo. El procesamiento de la información se realiza por medio de un protocolo de

comunicación entre UPTeCH y un dispositivo móvil. UPTeCH fue diseñado para mantener el porcentaje de humedad conveniente para que una planta se mantenga en óptimas condiciones sin la supervisión del usuario. UPTeCH usa un microcontrolador de la marca Arduino por su facilidad de programación y por su compatibilidad con componentes electrónicos comúnmente usados en el mercado. El módulo ESP8266 permite agregar conexión inalámbrica al microcontrolador ofreciendo el protocolo TCP para el paso de información entre UPTeCH y un dispositivo móvil. La aplicación del dispositivo móvil está desarrollada en Android lo que hace posible la visualización gráfica de la temperatura para su monitoreo. El dispositivo ha sido implementado en oficinas y casas habitación para el cuidado de una planta. Un modelo de red neuronal tipo perceptrón es empleado para aproximar la función de control de humedad del dispositivo.

**Palabra(s) Clave(s):** Control de humedad, dispositivo electrónico, programación de dispositivo móvil.

## 1. Introducción

La automatización de procesos ha permitido al ser humano realizar actividades de forma más eficiente y programar los conocimientos de una persona especializada en microcontroladores para la ejecución de las tareas. Existen una gran variedad de aplicaciones donde se hace uso de la automatización, por ejemplo: en la automatización del registro de los datos de pacientes [1], controlar procedimientos para situaciones de emergencia en donde se ponga en riesgo la vida del ser humano [2].

En este artículo se presenta un dispositivo electrónico llamado Unidad de Procesamiento de Temperatura y Control de Humedad (UPTeCH) el cual contiene como microcontrolador un Arduino Nano debido a que simplifica la interfaz de programación y su compatibilidad con un gran número de sensores y actuadores que usualmente se consiguen en el mercado de electrónica [3]. El dispositivo UPTeCH consiste en una tarjeta electrónica formada por un sensor YL-69 con un módulo YL-38 y un sensor DHT11, los cuales miden la humedad del suelo y temperatura del ambiente respectivamente. Posteriormente los valores obtenidos

son leídos por el microcontrolador Arduino, el cual toma la decisión de encender una mini bomba de agua para el riego del subsuelo de una planta. Además se tiene la comunicación con un dispositivo móvil para monitorear el comportamiento del dispositivo electrónico y la medición de la humedad. De forma adicional el dispositivo electrónico contiene un display para mostrar la información desde el dispositivo.

En la literatura se puede encontrar una gran diversidad de dispositivos electrónicos para los sistemas de riego automático [4,5] por medio de tarjetas programables y microprocesadores, por ejemplo, el uso de FPGA (Field Programmable Gate Array) y microcontroladores [4,5]. UPTeCH usa la plataforma de Arduino debido a que es una plataforma simple, es accesible en precio y es amigable para programar-ensamblar los componentes electrónicos [6].

El mercado potencial que puede hacer uso de UPTeCH son usuarios que se ausentan por un largo período de tiempo y están preocupados por el cuidado de sus plantas. En muchos casos en zonas urbanas los tipos de plantas que se tienen son plantas de ornato y ornamentales.

UPTeCH puede ser usado por usuarios que desean mantener características estéticas en interiores de casas, negocios y edificios públicos. Por ejemplo:

- a) Usuarios que tienen a su cuidado cactus y tienen la necesidad de controlar la humedad para saber la frecuencia del riego. El cuidado de ejemplares de registro y en peligro de extinción conlleva tener un buen control de la humedad, ya que más del 70% de los ejemplares se pierden en invernaderos por no saber ¿cuándo? y ¿cómo? aplicar el riego.
- b) Usuarios que producen frutas, hortalizas, flores, fuera de la época de cultivo y que tienen la necesidad de hacerlo en invernaderos. En un invernadero podemos controlar las condiciones del clima y por lo tanto el control de enfermedades. La temperatura marca notablemente todos los procesos vitales de una planta, si sometemos las plantas a temperaturas muy bajas (-10 °C) o temperaturas muy elevadas (30 °C) la planta limitará cada uno de sus procesos fisiológicos, reflejándose en un menor crecimiento, follaje y tamaño de fruto.

Un dispositivo similar al que se presenta en este artículo es fabricado por la compañía Parrot el cual tiene como nombre Flower Power [7, 8]. Flower Power tiene una interface que puede ser usada desde un teléfono celular por medio de bluetooth y es compatible con equipos Android y iOS. Los parámetros que monitorea el dispositivo de las plantas son: luminosidad, temperatura, fertilizante y humedad. Flower Power no cuenta con actuadores, por lo que el usuario necesita intervenir para mantener en buen estado las plantas. El dispositivo usa pilas AAA y su autonomía promedio es de 6 meses y usa un termistor que ayuda a obtener la temperatura. En contraste con UPTECH, Power Flower no usa actuadores lo que presenta una desventaja para cuando los usuarios no pueden intervenir con el riego de las plantas. UPTECH hace uso de una mini bomba sumergible de 5 volts que permite hacer de forma automática el riego de la planta.

En [9,10] se presenta un dispositivo de un sistema de riego automático que ayuda a los agricultores en el proceso de riego. Este dispositivo permite a los agricultores recibir la información de los cultivos haciendo uso de un teléfono celular. La propuesta de los autores en el sistema automático de riego es el panel solar el cual garantiza que no existan fallos drásticos por alguna falla en la alimentación de energía del dispositivo. UPTECH puede hacer uso de paneles solares, sin embargo ha sido diseñado para trabajar en interiores por lo que en esta primera versión no fue considerado hacer uso de paneles solares.

En los sistemas de riego automáticos se han desarrollado algoritmos para controlar el suministro de agua. Este tipo de sistemas ayudan al usuario a decidir la cantidad y la frecuencia de suministro del agua. En [11] se presenta una máquina de soporte vectorial (SVM Support Vector Machine) para el control del riego para cuando los usuarios no tienen experiencia en la frecuencia y cantidad de riego de las plantas. Las máquinas de soporte vectorial son algoritmos usados para la clasificación de patrones y aproximación de funciones haciendo uso de funciones Kernel [12]. Otro de los algoritmos más usados para tareas de aproximación de funciones y clasificación de patrones son los modelos de redes neuronales tipo perceptrón también conocidas como Multilayer Perceptron (MLP).

El control de riego de UPTECH está basado en un modelo de red neuronal llamado Hyperconic Multilayer Perceptron (HC-MLP) cuyas neuronas en la capa oculta producen regiones de decisión no lineales [13].

En [14] el modelo HC-MLP presentó ventajas sobre el modelo de red neuronal tradicional para tareas de aproximación de funciones. Por lo tanto, en el control del suministro del agua en UPTECH se hace por medio de la aproximación de una función de humedad haciendo uso de un modelo de red HC-MLP. La función de humedad se define a partir del tiempo que debe estar en operación la bomba del agua y el tipo de suelo donde se tiene la planta.

El resto del artículo consta de 4 secciones. El primer apartado es el desarrollo donde se explicará el diseño del dispositivo UPTeCH, el flujo de información entre los diferentes componentes, para llevar a cabo el monitoreo y procesamiento de los datos de humedad y temperatura de la planta, también se da a conocer el desarrollo de la aplicación móvil realizada para dispositivos móviles con sistema operativo Android. La sección 3, presenta los resultados obtenidos al implementar el dispositivo UPTeCH y la funcionalidad de la aplicación móvil. En la sección 4, se presenta una discusión acerca de la funcionalidad y ventajas del dispositivo, además de mencionar las limitaciones que éste tiene y sugerencias para ampliar el servicio que brinda. Finalmente, la sección 5 presenta la conclusión de este artículo, proponiendo trabajos futuros que motiven mejoras al dispositivo.

## **2. Desarrollo**

En la figura 1, se presenta el diagrama de componentes del dispositivo UPTECH. UPTECH está integrado de una fuente de voltaje de 5 V, una tarjeta programable Arduino Nano, un módulo Wifi para la conexión de datos entre UPTECH, un dispositivo móvil, un sensor de humedad, una mini bomba de agua como actuador, una pantalla LCD de 16x2 y un driver L293B (activa y desactiva la mini bomba del agua).

El voltaje del circuito es de 5 V, sin embargo se integra un regulador de voltaje para el módulo Wifi debido a que este opera a 3.3 V.



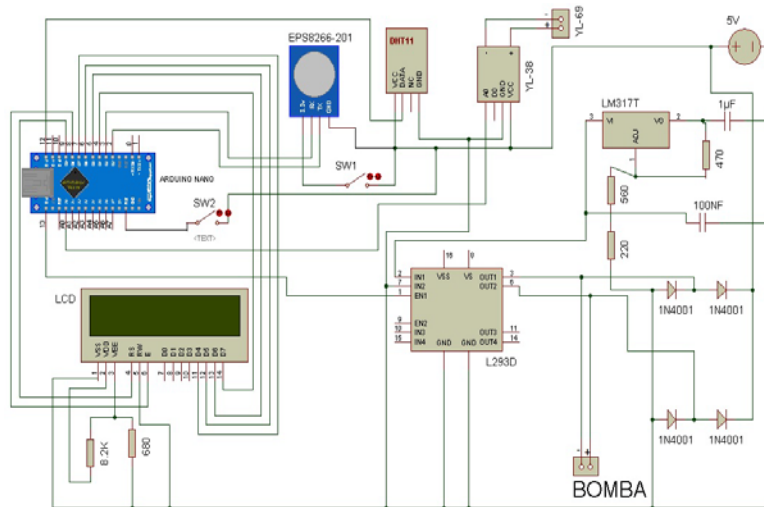


Figura 1 Diagrama de Componentes del dispositivo UPTECH.

La lista de los componentes que integran UPTECH, son:

- a) Arduino: arduino es una plataforma de código abierto la cual está compuesta de hardware y software que pueden integrarse fácilmente en proyectos de electrónica. Las dimensiones del arduino nano son de 0.73 pulgadas de ancho y 1.7 pulgadas.
- b) Módulo ESP8266-201. El módulo ESP8266-201 es un módulo de comunicación inalámbrica que permite añadir conexión Wifi entre la tarjeta arduino y un teléfono celular a través de una red local. Las características del módulo son las siguientes:
  - ✓ Protocolos soportados: 802.11 b/g/n.
  - ✓ Wi-Fi Direct (P2p), Soft Access Point.
  - ✓ Stack TCP/IP integrado.
  - ✓ PLL, reguladores y unidades de manejo de energía integrados.
  - ✓ Potencia de salida: +19 dBm en modo 802.11b.
  - ✓ Sensor de temperatura integrado.
  - ✓ Consumo en modo de baja energía: <10uA
  - ✓ Procesador integrado de 32 bits, puede ser utilizado como procesador de aplicaciones.
- c) Sensor YL-69 y módulo YL-38. El sensor YL-69 mide la humedad haciendo uso de dos placas las cuales están cubiertas de una capa de material

conductor. Cuando en el suelo hay humedad se genera un paso de corriente entre las dos placas. El módulo YL-38 transforma la señal del sensor YL-69 a una entrada analógica al arduino. El intervalo de valores que se obtienen están entre (0,1023). Cuando el valor está más cercano a 0 se define que el porcentaje de humedad es del 100%.

- d) Sensor DHT11. Es un sensor digital de temperatura y humedad del ambiente. Utiliza un sensor de humedad capacitivo y un termistor para medir el aire circundante.
- e) Circuito integrado L293b. El circuito integrado consta de 4 canales los cuales ofrecen hasta un amperio de corriente de salida. Los 4 canales pueden controlarse por medio de una señal de entrada compatible con TTL. Además, cada par de drivers cuenta con una entrada de inhibición que “apaga” los 4 transistores internos del circuito. El diagrama de pines del L293B y la tabla donde se describe el funcionamiento de cada Pin, puede encontrarse en la guía del fabricante [15].
- f) LCD 16x2. La pantalla de cristal líquido LCD o display para mensajes (figura 2), tiene la capacidad de mostrar el porcentaje de humedad mediante un cualquier carácter alfanumérico.
- g) Regulador de voltaje. El LM317 es un regulador de tensión positivo con solo 3 terminales y con un rango de tensiones de salida desde los 1.25 hasta 37 V. Los patillas son> Entrada (IN), Salida (OUT) y Ajuste (ADJ). Para lograr una variación de tensión se añaden 2 resistencias (una de ellas de resistencia variable). En la figura 3 se presenta la configuración del regulador de voltaje empleado en UPTECH.



Figura 2 LCD o Display usado en el dispositivo UPTECH.

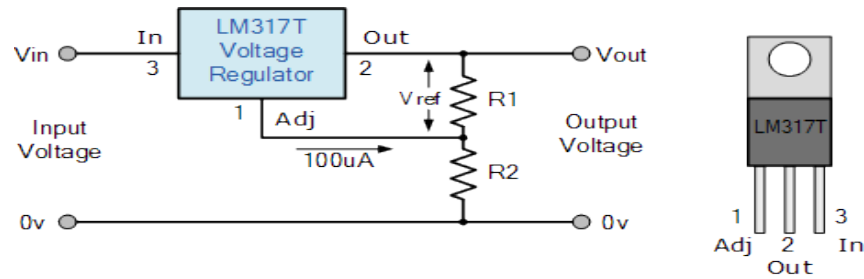


Figura 3 Conexión del LM317T.

En la figura 4 y 5 se presenta una fotografía del dispositivo UPTECH y su funcionamiento con todos los componentes que lo integran respectivamente. Las dimensiones de UPTECH estén definidas de la siguiente forma:

- Largo: 5.90 pulgadas.
- Ancho: 2.95 pulgadas.
- Alto: 0.826 pulgadas.

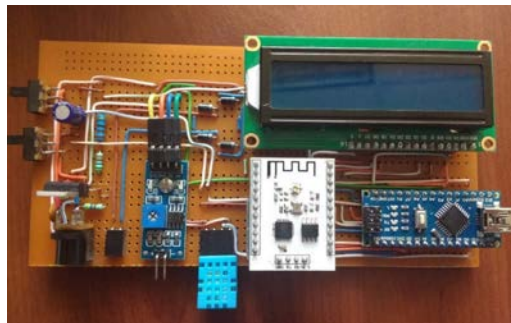


Figura 4 Fotografía del dispositivo UPTECH.

En la programación de la tarjeta programable arduino se usaron las librerías DHT.h para hacer uso del sensor de temperatura DHT11 y LiquidCrystal.h para hacer uso del display [16,17]. El uso de UPTECH implica las siguientes etapas:

- Configurar un servidor haciendo uso del módulo Wifi [18].
- Establecer una conexión como cliente desde el dispositivo móvil.
- Obtener información de la temperatura y humedad haciendo uso de los sensores.
- Enviar la información al dispositivo móvil.

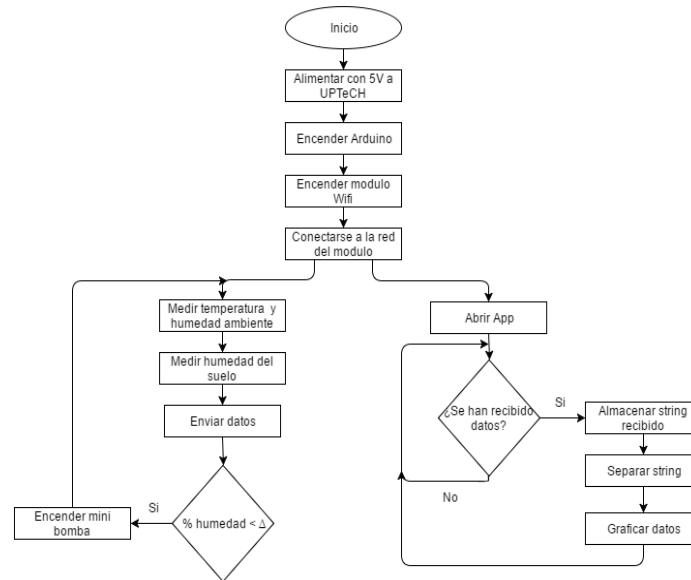


Figura 5 Funcionamiento de UPTECH y la aplicación en Android.

La aplicación está programada para funcionar en los dispositivos Android en su versión 4.2 o superior y menor a 5.0. La programación del dispositivo móvil se basa en el uso de sockets. Un socket permite intercambiar cualquier flujo de datos de manera confiable y ordenada. En la aplicación se usaron sockets basados en el modelo TCP/IP. El modelo TCP/IP describe un conjunto de guías generales de operación que definen un protocolo el cual permite que se pueda tener comunicación entre el dispositivo UPTECH y el teléfono celular.

El dispositivo UPTECH funciona como servidor y el teléfono celular como cliente por lo cual el primer equipo en ser activado es UPTECH y después el teléfono celular se conecta a UPTECH por medio de una IP fija. El modelo Wifi ya tiene configurada una IP la cual debe ser configurada al celular.

En la figura 6 se presenta un ejemplo de la instalación del sensor usando una planta *Beaucarnea recurvata*, o comúnmente llamada Pata de elefante la cual para su cuidado requiere de lo siguiente:

- Temperatura ideal: 16-21 °C
- Temperatura mínima: 3-6 °C
- Riego: Dejar secar capa superficial entre riegos
- Luz: De luminoso a muy luminoso

- Los riegos deben ser moderados. El exceso de agua hace que el tallo de la planta no se encuentre sano.

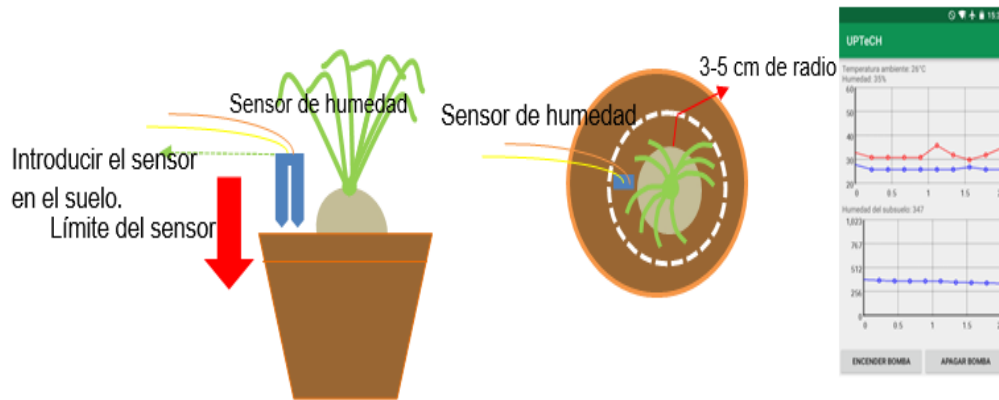


Figura 6 Funcionamiento de UPTECH y la aplicación en Android.

La posición del sensor en la planta se instala en un rango de 3 cm a 5 cm a partir de la parte posterior del recipiente. De esta forma, el dispositivo UPTECH se implementa para un sistema de riego por goteo. La aplicación del dispositivo móvil desarrollado en Android presenta al usuario la humedad con respecto al tiempo de medición por el dispositivo UPTECH. De igual forma en la figura 6, se presenta la pantalla de la aplicación, donde el eje “x” presenta el tiempo de medición y el eje “y” presenta el porcentaje de temperatura en el suelo.

### 3. Resultados

En la tabla 1 se presentan cuatro lecturas de la humedad en un suelo arcilloso. El volumen del recipiente que contiene el sustrato es de 212 centímetros cúbicos. La mini bomba de agua suministra de forma uniforme el agua para 4 recipientes. La mini bomba se activa 0.5 s, 1 s, 1.5 s y 2 s para los cuatro recipientes respectivamente. El porcentaje de humedad es al 100% cuando la lectura del sensor de humedad del suelo  $\alpha$  se aproxima a 0. El porcentaje de humedad se calcula por medio de la ecuación 1.

$$\text{Porcentaje Humedad} = 100 - \frac{100(\alpha)}{1023} \quad (1)$$

Tabla 1 Humedad usando el sensor YL-69 y el módulo YL-38.

Tiempo de Riego con Mini-Bomba ( segundos)	Lectura del sensor $\alpha$	Porcentaje de Humedad Promedio-Desviación Estándar	
0.5	259.74	58.12%	0.311
1.0	264.52	62.72%	0.1048
1.5	383.50	74.14%	0.1075
2	428.58	74.60%	0.1412

En la figura 7 se presenta el comportamiento de la medición de la humedad en un suelo arcilloso. El promedio de la temperatura de los cuatro muestreos son empleados para la aproximación de una función de control para accionar la mini bomba de agua en función de la humedad requerida por una tipo de planta determinado. En el eje “y” se presenta el porcentaje de humedad y en el eje “x” se presenta el tiempo en segundo de cuando se obtuvo la muestra durante 45 segundos.

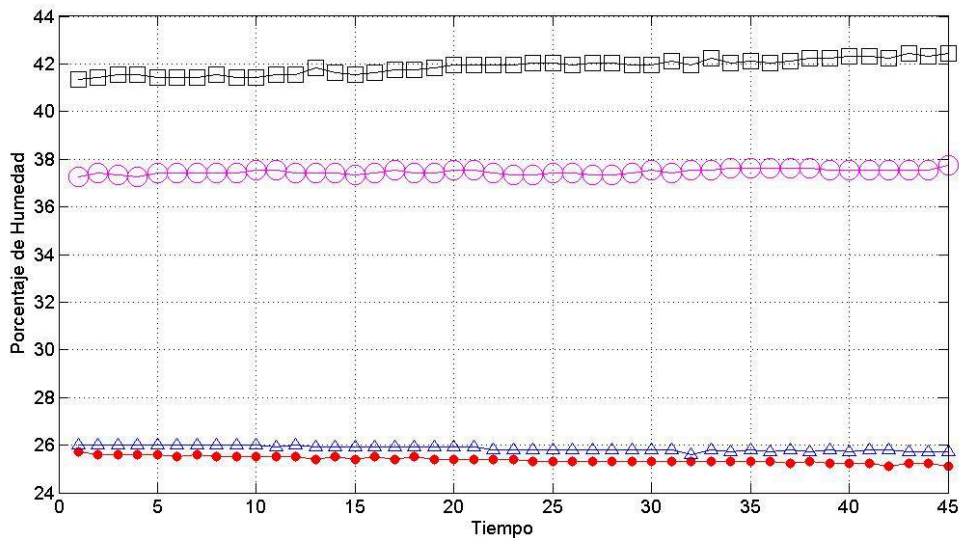


Figura 7 Humedad en un suelo arcilloso y en un volumen de 212 centímetros cúbicos.

En la figura 8 se presenta el modelo empleado por un modelo de red neuronal tipo perceptrón el cual define límites de decisión no lineales. El modelo empleado es llamado Hyperconic Multilayer Perceptron (HC-MLP) el cual ha brindado resultado superiores con respecto al modelo de red neuronal perceptrón tradicional [13,14] para tareas de clasificación de patrones y aproximación de funciones.

El modelo de red neuronal consta de una neurona en la capa de entrada, una neurona en la capa oculta y una neurona en la capa de salida. La función de activación de la red es una función sigmoide bipolar y el entrenamiento de la red es usando un algoritmo evolutivo. El algoritmo evolutivo es el algoritmo SEA (An evolutionary algorithm based on spherical inversions) y se usó una población de 100 partículas [19, 20]. El parámetro de paro del entrenamiento de la red fue de 5000 generaciones y el error de entrenamiento fue de  $5.0274e-004$ .

La entrada de la red neuronal es el porcentaje de humedad que se requiere en el suelo. La salida de la red neuronal proporciona el tiempo en segundos en que se deberá mantener encendida la mini bomba.

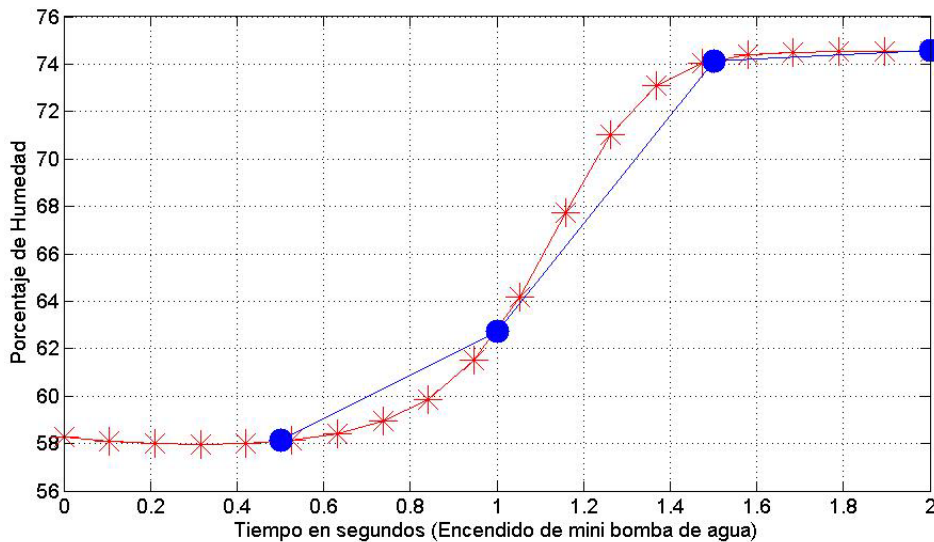


Figura 8 Modelo para el control de humedad usando la red neuronal HC-MLP.

#### 4. Discusión

En este artículo se presenta un dispositivo para mantener en condiciones saludables una planta. En la mayoría de los casos, UPTeCH ha brindado practicidad para el cuidado de las plantas cuando los usuarios se ausentan de los espacios de trabajo o casas habitación por más de 15 días. Sin embargo, hay parámetros que se toman en cuenta como son: a) el tipo de suelo, el muestreo del sensor y el volumen del recipiente donde se deposita el sustrato. Por ejemplo, la absorción del agua en el sustrato no es la misma cuando se tiene un suelo

arenoso, arcilloso y calizo. Además no todos los tipos de suelos son aptos para un determinado tipo planta. Por otro lado, se obtienen de forma experimental mediciones de temperatura para el tipo de mini bomba que se instala en el dispositivo UPTECH.

En este artículo se presenta una aplicación del modelo de red neuronal HC-MLP aplicado a la aproximación de la función de riego del dispositivo de UPTECH. La aproximación del modelo de red neuronal puede cambiar en función del tipo de bomba que se tenga. En este trabajo se considera el tiempo en segundos que se tiene encendida la mini bomba y no la cantidad en milímetros cúbicos de agua que se pueden suministrar con la mini bomba.

La sincronización del dispositivo electrónico y la aplicación del dispositivo móvil son por medio de una red local. El radio de alcance de la señal emitida por el módulo Wifi es de 10 metros. Sin embargo, pueden usarse antenas repetidoras para lograr un mayor radio de alcance para lograr una mayor cobertura en casas amplias o espacios abiertos

Es necesario indicar que existen ciertas perturbaciones en el control de la humedad, tales como el tiempo que tarda el suelo en absorber el agua suministrada por el dispositivo. Para que los valores de riego se auto ajusten en el dispositivo es necesario diseñar una base de datos la cual contenga los tipos de plantas más comunes y facilitar el uso del dispositivo por parte de un usuario que no es experto en plantas.

## **5. Conclusiones**

En este artículo se presenta el diseño de un dispositivo electrónico para monitorear la temperatura y el control de la humedad en el suelo de una planta. El monitoreo se realiza por medio de una aplicación desarrollada en Android. Se usa un modelo de red neuronal llama Hyperconic Multilayer Perceptron para aproximar el tiempo en segundos que deberá mantenerse activa la mini bomba para conseguir un porcentaje determinado de humedad en el suelo donde está la planta.



El trabajo futuro es integrar parámetros al modelo de red neuronal como el volumen del recipiente que contiene el sustrato, el tipo de suelo y las características de la planta. Además de desarrollar una base de datos de plantas de ornato que contenga las características y sus requerimientos para que el dispositivo puede funcionar sin la necesidad de un experto.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] D. C. Dimitroff, I. F. Chang, An objectoriented approach to automating patient medical records. In Computer Software and Applications Conference, COMPSAC 90. Proceedings, Fourteenth Annual International 1990. Pp. 82-87.
- [2] S. S. Choi, S. H. Chang, D. H. Lee, "Automating strategies of emergency operation for optimal shutdown in pressurized water reactors". IEEE Transactions on Nuclear Science. Vol. 45. No. 1. 1998. Pp.17-29.
- [3] Arduino. <http://arduino.cc>. Agosto de 2016
- [4] J. Li, W. Tu, "An Irrigation Control System Based on C8051F and ARM". International Conference In Digital Manufacturing and Automation (ICDMA). Vol. 1. 2010. Pp. 210-213.
- [5] Z. Lai, Y. Dai, "An Irrigation Control System Based on an FPGA". Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). December 2012 Pp. 159-163.
- [6] F. H. Toribio Destro, R. Costa, F. Iaione, "A low-cost system for experiments with digital circuits". In Frontiers in Education Conference (FIE). Vol. 00. No. 0. October 2015. Pp. 1-6.
- [7] Parrot Flower Power. <http://www.parrot.com/es/productos/flower-power/>. Agosto de 2016.
- [8] "News Briefs in Computer". IEEE-Explorer. Vol. 47. No. 4. Apr. 2014.Pp. 15-19.
- [9] L. Bhaskar, B. Koli, P. Kumar, V. Gaur, "Automatic crop irrigation system. In Reliability". 4th International Conference on Infocom Technologies and

- Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions). September 2015. Pp. 1-4.
- [10] J. Uddin, S. T. Reza, Q. Newaz, T. Islam, J. M. Kim, "Automated irrigation system using solar power". 7th International Conference on Electrical & Computer Engineering (ICECE). December 2012. Pp. 228-231.
- [11] Y. Suzuki, K. Nakamatsu, H. Mineno, "A Proposal for an Agricultural Irrigation Control System Based on Support Vector Machine". IIAI International Conference on In Advanced Applied Informatics (IIAIAI). August 2013. Pp. 104-107.
- [12] X. Zhou, X. Zhang, B. Wang, Online Support Vector Machine: A Survey. In Harmony Search Algorithm. 2016. Springer, Berlin Heidelberg. pp. 269-278
- [13] J. P. Serrano-Rubio, R. Herrera-Guzmán, A. Hernández-Aguirre, "Hyperconic multilayer perceptron for function approximation". Annual Conference of Industrial Electronics Society, IECON 2015-41st the IEEE. November 2015. Pp. 4702-4707.
- [14] J. P. Serrano-Rubio, A. Hernández-Aguirre, R. Herrera-Guzmán, "Hyperconic Multilayer Perceptron". Neural Processing Letters. 2016. Pp.1-30.
- [15] SGS-Thomson Microelectronics, Driver Push – Pull de 4 Canales L293B. [http://www.todopic.com.ar/utiles/l293b\\_driver\\_en\\_puente.pdf](http://www.todopic.com.ar/utiles/l293b_driver_en_puente.pdf). Agosto de 2016.
- [16] Sensor de Humedad de Suelo - Soil Moisture. <http://saber.patagoniatec.com/sensor-de-humedad-de-tierra-soil-moisture-arduino-argentina-ptec/>. Marzo 2016.
- [17] Sensores de Temperatura DHT11. <http://www.prometec.net/sensores-dht11/>. Abril 2016.
- [18] Module Wifi. <http://www.instructables.com/id/Programming-ESP8266-ESP-201-stand-alone-with-Ardui/>. Abril de 2016.
- [19] J. P. S. Rubio, A. H. Aguirre, R. H. Guzmán, "Function Optimization in Conformal Space by Using Spherical Inversions and Reflections". In Ibero-

American Conference on Artificial Intelligence. November 2014. Pp. 418-429.

- [20] J. P. Serrano Rubio, A. Hernández Aguirre, R. Herrera Guzmán, "SEA: an evolutionary algorithm based on spherical inversions". In Proceedings of the Companion Publication of the 2014 Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation. July 2014. Pp. 63-64.

## **7. Autores**

Ing. Ander Osvaldo Manjarrez Carrillo obtuvo su título de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato con especialidad en Software en el 2016.

Ing. Juan Manuel Banda Chávez obtuvo su título de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato con especialidad en Software en el 2016.

Ing. Laura Yaremith Damián Padilla obtuvo su título de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato con especialidad en Software en el 2016.

Ing. Luz María Rodríguez Vidal obtuvo su título de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato con especialidad en Redes en el 2006.

Omar Francisco Peraza Arjona estudiante de la carrera Ingeniería en Mecatrónica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato desde el año 2013

Dr. Juan Pablo Serrano Rubio es profesor e investigador en la Maestría en Tecnologías de la Información y obtuvo su título de Doctor en Ciencias con Orientación en Computación por el Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT).

Dr. Rafael Herrera Guzmán es investigador del Centro de Investigación en Matemáticas AC (CIMAT) y obtuvo el grado de Doctor en Matemáticas por la Universidad de Oxford, Inglaterra, en 1998.

**EVALUACIÓN ESTRUCTURAL Y ANÁLISIS  
ESTADÍSTICO DE UNA PIEZA MAQUINADA EN UNA  
ETAPA COMO SUSTITUTO DE UN COMPONENTE  
ENSAMBLADO PARA UN AVIÓN COMERCIAL  
UTILIZANDO MEF Y EXTENSOMETRÍA**

***Ismael Mendoza Muñoz***

Universidad Autónoma de Baja California  
*ismael.mendoza@uabc.edu.mx*

***Víctor Nuño Moreno***

Universidad Autónoma de Baja California  
*vnuno@uabc.edu.mx*

***Luis Omar Moreno Ahedo***

Universidad Autónoma de Baja California  
*luis.omar.moreno.ahedo@uabc.edu.mx*

***Karla Isabel Velázquez Victorica***

Universidad Autónoma de Baja California  
*isabel.velazquez@uabc.edu.mx*

***Aida López Guerrero***

Universidad Autónoma de Baja California  
*aida.lopez@uabc.edu.mx*

***Luz del Consuelo Olivares Fong***

Universidad Autónoma de Baja California  
*luz.olivares@uabc.edu.mx*

## Resumen

Algunas piezas fabricadas en el rubro aeroespacial requieren de operaciones de ensamble para formar una nueva entidad. Se espera que en las zonas donde la unión se lleva a cabo, esté presente una concentración de esfuerzos, lo que lleva a aumentar las posibilidades de presencia fallo estructural generado por las condiciones en las que la pieza montada está en funcionamiento. En este estudio se realizó una evaluación estructural a flexión entre un componente estructural ensamblado y una pieza maquinada en una etapa con las mismas características geométricas, siendo la propuesta para sustituir al componente ensamblado. Para verificar las propiedades mecánicas se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales en conjunto con el método de los elementos finitos. Con los datos obtenidos en galgas, se realizó un análisis de varianza para evaluar si existe alguna diferencia significativa entre las medias muestrales. Se observa que el valor de  $P=0.236$  es mayor al valor de  $\alpha=0.05$ , por lo que se afirma con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las medias muestrales de las deformaciones entre los tratamientos de pieza unitaria y pieza ensamblada. Lo anterior sugiere que ambos componentes funcionan igual bajo la condición de flexión.

**Palabra(s) Clave(s):** ANOVA, Diseño Mecánico, Extensometría, Galgas Uniaxiales.

## 1. Introducción

En la industria maquiladora, los procesos de manufactura son de interés para los departamentos de ingeniería debido a que sostienen entre sus principales objetivos la reducción de costos a través de la reducción de tiempo estándar. Para alcanzar esta meta, se ha vuelto una práctica común los rediseños de componentes a fin de reducir el número de ensambles. Un caso específico se presentó en una empresa local del sector aeroespacial en Mexicali por parte de la gerencia de manufactura, la cual requirió realizar una estimación estructural a fin de ver la factibilidad de reemplazar un componente ensamblado para uno de sus aviones comerciales por una pieza maquinada en una etapa con las mismas

características geométricas. Para lo anterior, la empresa proporcionó información sobre el diseño (dimensiones, tolerancias, materiales, etc.), así como de los procedimientos de manufactura.

La pieza de análisis es un componente estructural ensamblado situado en la sección del cuerpo, más cercana a la cola entre los motores del avión privado, la cual ha sido modificada por políticas de confidencialidad de la empresa. La figura 1 muestra en modelo de análisis con su modificación para divulgación. Este componente ensamblado está formado por tres piezas con la misma aleación de aluminio. Dos elementos de refuerzo lateral se ensamblan por medio de remaches a una parte principal.

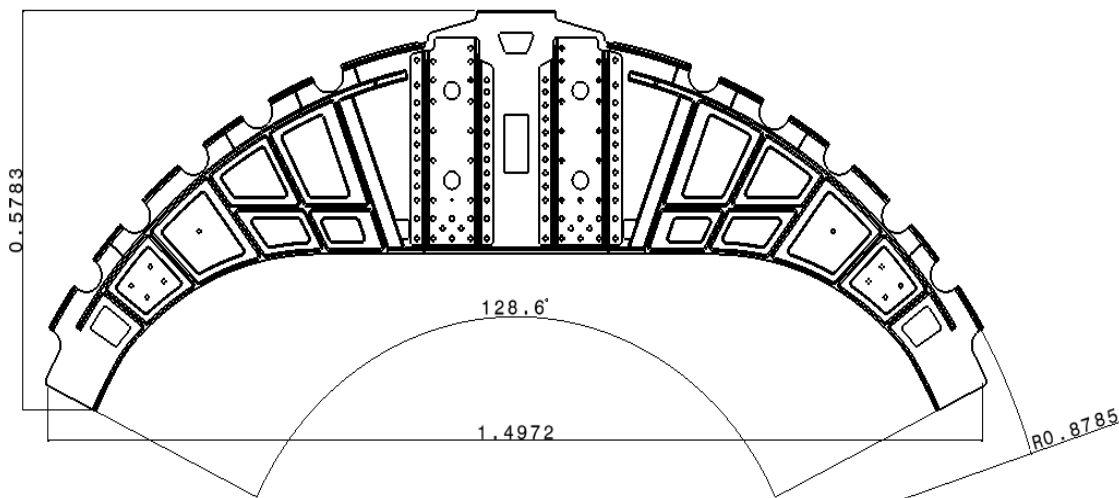


Figura 1 Pieza estructural ensamblada modificada para avión comercial (unidad: metros).

El proceso de fabricación consta de la instalación parte principal en una fixtura donde después las partes de refuerzo lateral se ensamblan cada una por 46 remaches de 0.125 pulg de diámetro. Al final, cinco agujeros fueron perforados en el cuerpo de cada parte secundaria, de un diámetro de aproximadamente 0.5 pulg. Basado en los comentarios del personal de fabricación, es una práctica común el re-trabajo de la pieza en la fase de perforación. Este proceso de re-trabajo consiste en colocar un material de injerto.

Se espera que al sustituir el componente estructural ensamblado por una pieza escasa de ensambles (maquinada en una etapa), muestre un mejor

comportamiento estructural. Adicionalmente, se simplificará el proceso, y por consiguiente, los tiempos estándar disminuirán.

En este estudio, el modelo ensamblado se simplificó solo a dos filas de 3 remaches por parte secundaria, teniendo el componente ensamblado un total de 12 remaches.

Adicionalmente, se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales así como el método de los elementos finitos (MEF) utilizando el software ANSYS.

Se desconocen las condiciones de operación del componente estructural ensamblado, pero al considerar la ubicación de la pieza aeroespacial, se observa que está cercana de las turbinas como de sus refuerzos de sujeción y, debido a la propulsión generada, pudiera ser un punto de flexión importante, ya que podría ser el punto de origen de la flexión local que se presenta por la interacción de todo el fuselaje, considerando vital esta prueba para análisis.

## **2. Desarrollo**

El método del elemento finito se emplea de manera masiva en el análisis estático y dinámico de sistemas estructurales [1]. Mediante la simulación numérica, en particular mediante el método de los elementos finitos podemos evaluar los diferentes parámetros y condiciones, sin necesidad de hacer un gran número de ensayos, algo que para las aplicaciones industriales es muy importante [2].

Para realizar el análisis numérico en ANSYS, se establecieron las condiciones convenientes para analizar la pieza a flexión. Los parámetros para esta prueba constan de la aplicación de una carga puntual de 9.32Lbf en uno de los extremos de la pieza y el empotramiento de la misma en el opuesto. La distribución de esfuerzos y deformaciones unitarias para cada caso (componente ensamblado y pieza propuesta maquinada en una etapa) se presentan en la figura 2. Para ésta evaluación estructural, se toma la distribución de la deformación unitaria como referencia para realizar una comparación y validación de la prueba estructural física, ya que los resultados obtenidos de las galgas extensométricas uniaxiales son deformaciones unitarias en strain ( $\epsilon$ ).

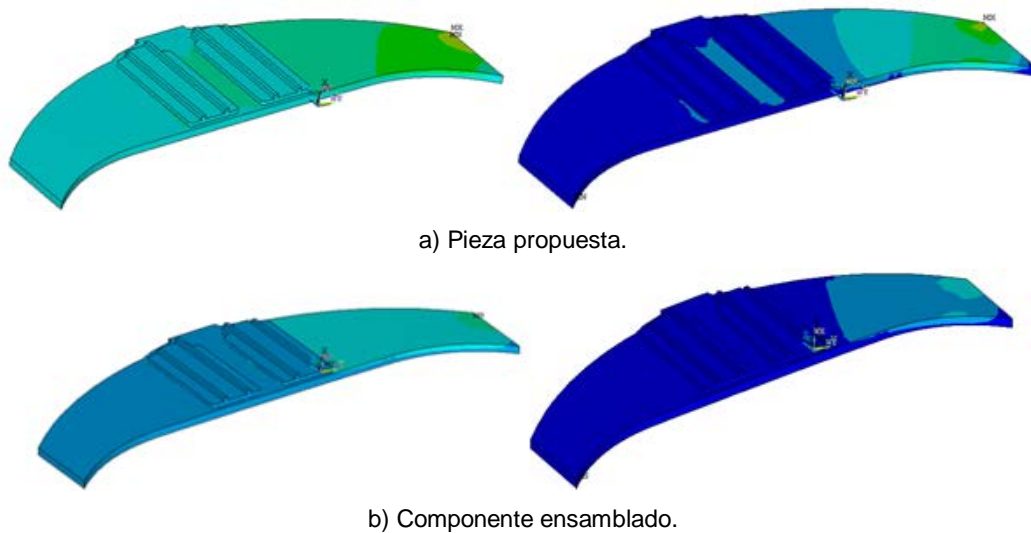


Figura 2 Distribución de esfuerzos (izq.) y deformaciones unitarias (der.) a Flexión.

Se aprecia en las imágenes pertenecientes al esfuerzo (izq.) en ambos escenarios, presentan una desemejanza evidente; la pieza propuesta presenta una distribución de esfuerzos gradual desde el empotramiento, hasta la zona donde se encuentra los cambios de sección debido a las piezas adjuntas, mostrando una interacción a lo largo del material y, en el caso del componente ensamblado, la distribución de esfuerzos no es tan evidente, sino tiende a ser más uniforme. Es importante indicar la ubicación y el valor de los esfuerzos máximos; donde para la pieza propuesta, se encuentra en el empotramiento (64.5 kpsi) y para la ensamblada, se muestran precisamente en la zona de la primera fila de remaches cercana al empotramiento (119 kpsi), por lo que se puede afirmar que al seguir esta tendencia, si se llegase a incrementar la carga, la pieza ensamblada fallaría justo en los elementos de sujeción debido a que los remaches actúan como elementos concentradores de esfuerzos. Al analizar las imágenes correspondientes a la deformación unitaria (der.), es evidente el rol de las piezas secundarias para los dos casos, presentando una tendencia similar a la obtenida en los resultados de esfuerzo (izq.). La deformación unitaria máxima, se ubica en el empotramiento ( $0.0272\varepsilon$ ) para la pieza propuesta, y en la primera fila de remaches cercana al empotramiento ( $0.0135\varepsilon$ ) para el componente ensamblado.



Para la prueba física de flexión, se maquinaron las partes (principal y secundarias) que conforman el componente ensamblado así como la pieza propuesta maquinada en una etapa utilizando aluminio 6061 T6. Los remaches a utilizar, son de 1/8" x 1/4" convencionales. La figura 3 muestra las piezas ya maquinadas.



Figura 3 Pieza propuesta maquinada y componente ensamblado base aluminio 6061 T6.

Una de las principales aplicaciones de esta aleación, gracias a su elevada resistencia a la tracción y a su excelente maquinabilidad y apariencia, se utiliza en la industria militar para la fabricación de soportes de culatas de fusil, en la industria del plástico para moldes prototipos o para inyección, soplado e inyección y en general para portamoldes y portatroqueles, entre otros usos. Entre otras ventajas se encuentran su excelente conductividad, baja densidad, nula toxicidad y que no produce chispa y excelente resistencia a la corrosión [3].

Cada modelo se empotró de un extremo en un banco de pruebas, dejando las partes secundarias orientadas hacia arriba y la zona libre hacia abajo, siguiendo las condiciones establecidas en el análisis por el MEF. El empotramiento de los modelos fue totalmente soportado en la mordaza del banco de pruebas y sujetado con 2 tornillos de ajuste. Se utilizaron galgas extensométricas uniaxiales Vishay EA-06-250 AF-120 las cuales se conectaron al equipo PXI de National Instruments. Para la conexión de las galgas, se utilizó un cuarto de puente de

Wheatstone. La figura 4 muestra uno de los modelos de estudio con la galga ya instalada.

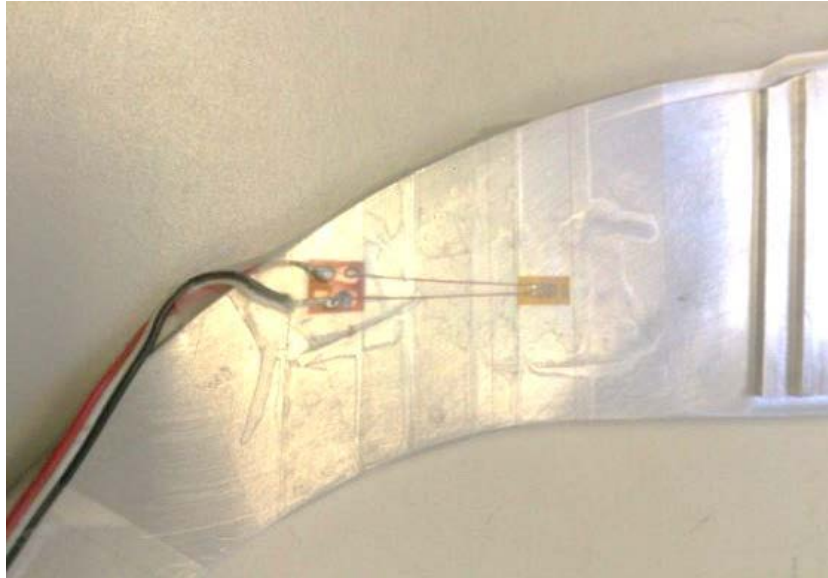


Figura 4 Galga extensométrica uniaxial en pieza propuesta.

Las galgas extensométricas son básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga. Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada [4].

Un puente de Wheatstone es un circuito con cuatro resistencias montadas como en la figura 5, en el caso de las cuatro resistencias fueran iguales a la tensión de salida será nula. Si se produjera una variación de la resistencia de una de las resistencias, por ejemplo  $R_1$  (podría ser el caso de una galga extensométrica colocada sobre un elemento estructural solicitado), el voltímetro registraría un movimiento de su aguja en uno u otro sentido según se aumente o disminuya ésta, lo cual es precisamente lo que se requiere.

La figura 6 muestra un circuito de cuarto de puente (porque utiliza como elemento activo una de las cuatro resistencias, en el que  $R_1$  representa a la galga. Nótese que hay 3 cables, 2 de ellos comunes a una terminal y conectados al punto C de conexión con la rama AC y al voltímetro; el otro se conecta en A; es recomendable

hacerlo así a fin de que la resistencia eléctrica del cable conductor no se registre como variación de  $R_1$ , sobre todo cuando existe un cableado largo [5].

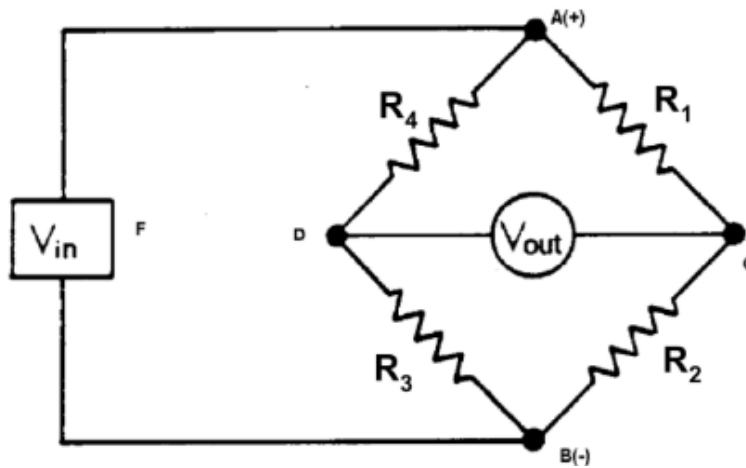


Figura 5 Puente de Wheatstone [5].

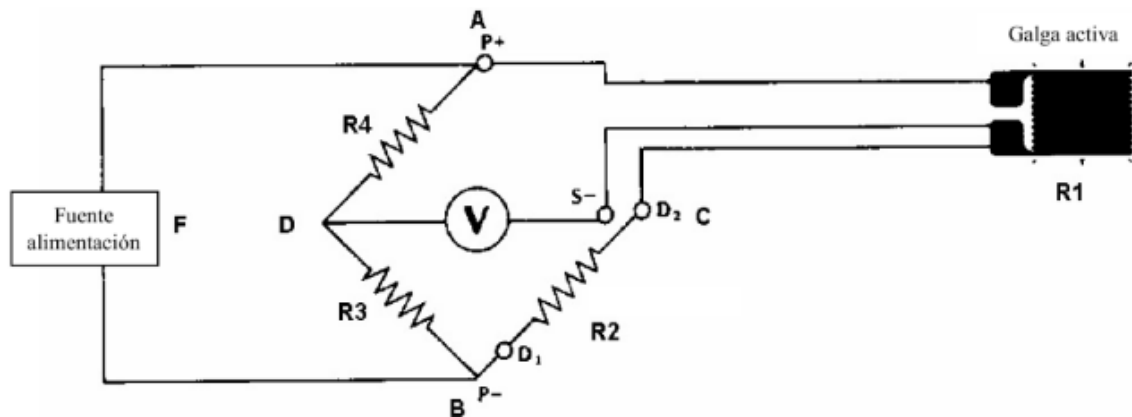


Figura 6 Puente de Wheatstone [5].

Una vez ya instaladas las galgas extensométricas uniaxiales en la misma ubicación para ambos modelos, se siguió con ingresar los parámetros en el software LabView. Del programa se tomaron 50 muestras para cada caso.

Con los datos anteriores, se propuso realizar una prueba de hipótesis a fin de determinar si existe una diferencia significativa entre ambos escenarios, proponiendo como hipótesis nula y alternativa, ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$H_0: \mu_{unit} = \mu_{ens} \quad (1)$$

$$H_1: \mu_{unit} \neq \mu_{ens} \quad (2)$$

Las pruebas de hipótesis o de significación son un procedimiento del análisis de datos muy utilizados en las aplicaciones de la estadística. El procedimiento usual para su aplicación consiste en obtener un valor p, definido como la probabilidad del valor observado y valores más extremos que él en la dirección de rechazar H0 y compararlo con un nivel de significación o valor  $\alpha$ , que generalmente se fija como 0.05. De esta forma se toma la decisión correspondiente [6].

### 3. Resultados

Las medidas estadísticas de dispersión de los datos obtenidos en las galgas extensométricas para la pieza propuesta (unitaria) como del componente ensamblado se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Medidas de dispersión de datos obtenidos en galgas para ambas piezas.

Pieza	N	Media ( $\epsilon$ )	Desv. Est.
Propuesta	50	0.00005760	0.00001966
Ensamblada	50	0.00006264	0.00002252

La prueba de hipótesis entre la pieza propuesta (unitaria) y el componente ensamblado se realizó a través de un análisis de varianza con un intervalo de confianza del 95% se presenta en la tabla 2.

Tabla 2 ANOVA Unidireccional: Pieza ensamblada y pieza unitaria.

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Factor	1	0.0000000	0.0000000	1.42	0.236
Error	98	0.0000000	0.0000000		
Total	99	0.0000000			

Las figuras 7 y 8 muestran la gráfica de valores individuales así como la gráfica de caja de los datos obtenidos en las galgas para cada caso.

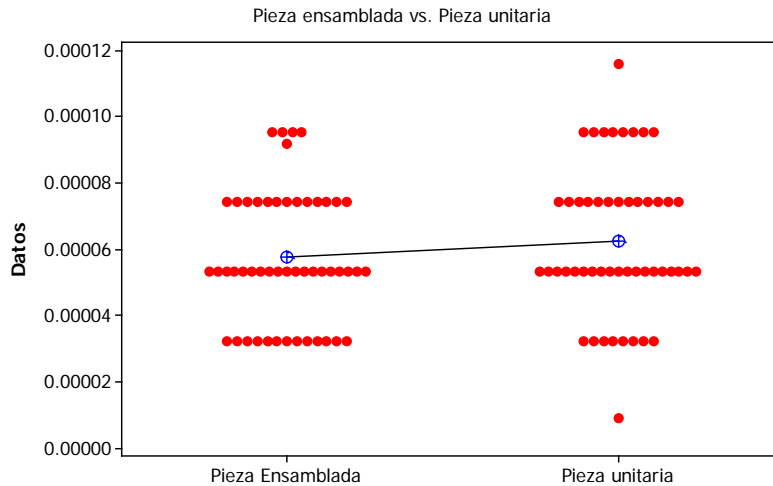


Figura 7 Gráfica de valores individuales de datos obtenidos en galgas.

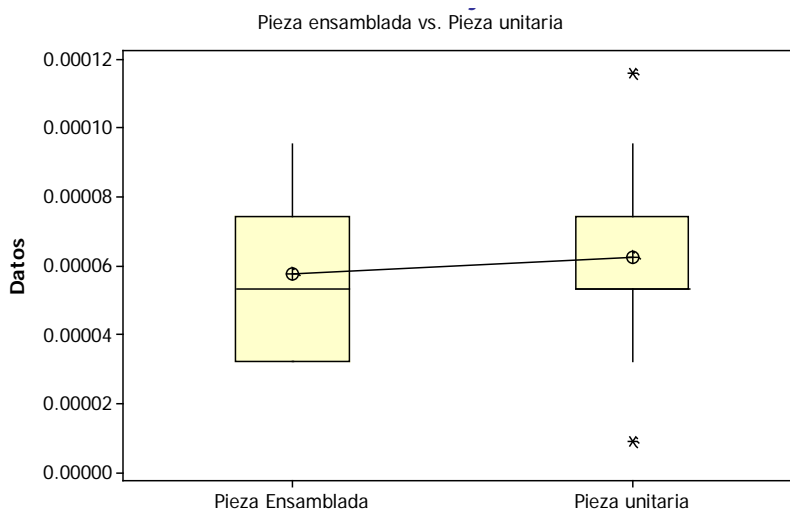


Figura 8 Gráfica de caja de datos obtenidos en galgas.

Los resultados obtenidos en el análisis numérico con el MEF utilizando ANSYS se obtuvieron al identificar el nodo que corresponde con la ubicación de la galga extensométrica, a fin de comparar y validar los resultados obtenidos en las galgas para ambas piezas. La tabla 3 muestra los resultados antes mencionados así como la ubicación dentro del modelo finito.

Tabla 3 Deformación unitaria obtenida en el punto de análisis por medio del MEF.

Pieza	Nodo	$\epsilon$
Propuesta	7897	0.0000584
Ensamblada	2622	0.0000517

#### 4. Discusión

Si se analizan los datos mostrados en la tabla 1, podemos apreciar que existe una diferencia entre las medias de los datos obtenidos en las galgas para cada caso, pudiendo decir que la pieza propuesta presenta mayor deformación unitaria que la ensamblada sin embargo, sería una afirmación sin un completo sustento estadístico.

Tomando como referencia la tabla 2 se observa que el valor de  $P=0.236$  es mayor al valor de  $\alpha=0.05$ , por lo que se acepta nuestra hipótesis nula, es decir, se afirma con un 95% de confianza que no existe diferencia significativa entre las medias muestrales de las deformaciones entre los tratamientos de pieza unitaria y pieza ensamblada. Por lo tanto se concluye que  $\mu_{unit} = \mu_{ens}$ .

En base a la gráfica de valores individuales (figura 7) se observa que la concentración de datos en ambos tratamientos (pieza ensamblada y pieza unitaria) se centra en los valores de 0.0000535 con un conteo de 19 datos en ambos casos. Lo anterior se refleja en que no existe mucha variación en la media de los tratamientos. Por otra parte la gráfica de caja (figura 8) nos muestra información relevante en relación a la distribución de los datos para cada uno de los tratamientos, por ejemplo, en ambos casos (pieza ensamblada vs pieza unitaria) se observa que en el tercer cuartil (75% de los datos) los datos se distribuyen en valores  $\leq 0.0000744$ , a diferencia del primer cuartil, en el caso de la pieza ensamblada el 25% de los datos se distribuyen en valores  $\leq 0.0000326$ , y para la pieza unitaria en valores  $\leq 0.0000535$ , sin embargo se observa que las medias de ambos tratamientos ( $\mu_{unit} = \mu_{ens}$ ) tienen poca variación considerando valores de 0.000057604 y 0.000062642 respectivamente.

Finalmente, al comparar las medias obtenidas en los resultados de las galgas con los resultados obtenidos en el punto de análisis por el MEF (ver tabla 3), se puede apreciar que existe una diferencia mínima, manteniendo una ligera tendencia a que la pieza propuesta tenga mayor deformación unitaria que el componente ensamblado.

## 5. Conclusiones

En relación a la conversión de piezas ensambladas a una propuesta unitaria, se propuso con el fin de obtener un componente con mejores características estructurales (rigidez y estabilidad) las cuales se aprecian al analizar la deformación unitaria obtenida para las galgas extensométricas como los resultados obtenidos por el MEF. Podemos decir que los resultados no favorecen a la pieza propuesta con los datos obtenidos en ANSYS mostrados en la tabla 3, sin embargo, los datos obtenidos en galgas y analizados estadísticamente, muestran que no existe diferencia significativa entre las medias de ambos casos, sugiriendo que presentan la misma respuesta ante la carga aplicada. Estas conclusiones dejan una apertura para realizar un análisis más a fondo a fin de establecer una tendencia tajante para tomar la decisión de si es conveniente o no reemplazar la pieza ensamblada por la pieza propuesta. Una propuesta de ello es el realizar un diseño experimental más robusto, que incluya al menos 3 niveles de carga. También puede establecerse un mayado con 2 o más galgas extensométricas, a fin de tener más respuestas por nivel de carga. Otra alternativa, es el trabajar con un medio puente o puente completo de Wheatstone. Sin embargo, si consideramos además el factor de reducción de tiempo estándar, se puede afirmar que el beneficio existe con la pieza propuesta, dando más empuje a ser candidata para cambio de ingeniería.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] W. Vélez, D. Gómez, P. Thomson, "Ajuste de modelos de elementos finitos". *Dyna*. Vol. 76. Núm. 158. Junio 2009. Pp. 177-189.
- [2] W. Bullón, J. Acosta, R. Franco, Q. Valverde, "Simulación de un proceso de soldadura mediante un modelo termo-mecánico considerando el efecto de esfuerzos residuales utilizando el método de los elementos finitos". *Memorias 8o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*. Cusco. Perú. 2007. Pp. 1-13.

- [3] A. Echavarría, G. A. Orrego, “Metalurgia básica de algunas aleaciones de aluminio extruidas o laminadas”. *Revista Colombiana de Materiales*. Núm. 2. 2012. Pp. 1-20.
- [4] B. Bellini, “Sensores de presión utilizados en las plataformas de fuerza aplicadas al estudio de la posturografía”. Universidad de la República. Núcleo de Ingeniería Biomédica. Facultades de Medicina e Ingeniería. 2009. Pp. 1-10.
- [5] E. Rincón, L. Castro Martínez, D. Iglesias Ibáñez, “Resistencia de materiales: determinación de tensiones y deformaciones”. 2006. Editorial Visión Libros. Madrid. Pp. 8-9.
- [6] P. A. Monterrey, “Caracterización de la distribución de los valores P de las pruebas paramétricas en poblaciones normales”. *Revista de Investigación Operacional*. Vol. 37. Núm. 1. 2016. Pp. 38-48.

## **7. Autores**

Dr. Luis Omar Moreno Ahedo: es profesor investigador de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, obtuvo su grado de Maestría y Doctorado en el Departamento de Control Automático del CINVESTAV-IPN en Cd. De México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

Ismael Mendoza Muñoz: es Ingeniero Mecánico con Maestría en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente está llevando a cabo el programa de Doctorado en Ciencias por la UABC. Es profesor de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignado al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocado al área de Manufactura y Diseño.

Víctor Nuño Moreno: es Ingeniero Eléctrico Mecánico por la UABC Mexicali, con una especialidad en la enseñanza. Tiene una Maestría en Sistemas de Fabricación y Procesos por el CETYS Mexicali. Tiene segundo título de Maestría en Administración Industrial por CETYS Mexicali. Tiene un Doctorado en Ingeniería por la UABC Mexicali. Actualmente es profesor de tiempo completo en la UABC Mexicali.



Karla Velázquez Victorica: es Ingeniero Industrial con Maestría en Ingeniería y Doctorado en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente es responsable del programa educativo de Ingeniero Industrial. Es profesora de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignado al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocada al área de Estadística y Optimización.

Aída López Guerrero: es Ingeniero Industrial con Maestría en Ciencias, ambos por la Universidad Autónoma de Baja California. Es profesora de tiempo completo en la facultad de Ingeniería Mexicali de la UABC, asignada al programa educativo de Ingeniero Industrial, enfocada al área de planeación, estadística y humanidades.

Luz del Consuelo Olivares Fong: es Ingeniero en Manufactura por el Centro de Enseñanza Técnica y Superior (CETYS Universidad, Mexicali/Centro Politécnico Superior, España); Maestro en Ingeniería con el proyecto Ecoeficiencia en las PYMES en Mexicali, B.C.: en el sector manufacturero” por el Instituto de Ingeniería, UABC. Actualmente cursa el programa de Doctorado en Proyectos de Ingeniería por la Universidad Internacional Iberoamericana. Desde 2006 es profesora de la Facultad de Ingeniería, siendo en 2014 su asignación como profesor de tiempo completo en la Universidad. Ha participado en proyectos de Innovación-Conacyt. Sus áreas de interés incluyen materiales de ingeniería, procesos de manufactura, desarrollo sustentable y comportamiento organizacional.

# **DISEÑO DE UN SISTEMA PORTÁTIL PARA MEDICIÓN DE BIOIMPEDANCIA**

***Francisco Juárez León***

Instituto Tecnológico de Celaya

*f.ale\_juarez@hotmail.com*

***Agustín Ramírez Agundis***

Instituto Tecnológico de Celaya

*agustin.ramirez@itcelaya.edu.mx*

***Noé Vela Aguirre***

Instituto Tecnológico de Celaya

*noe.vela@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

El presente artículo describe el diseño, implementación y resultados obtenidos de un sistema electrónico portátil para medición de bioimpedancia basado en el circuito integrado AD5933. El sistema desarrollado permite al usuario realizar el proceso de medición utilizando un barrido de frecuencia entre 1 Hz y 100 kHz, siendo éste un amplio rango de medición suficiente para caracterización de bioimpedancias y más vasto que el de sistemas similares reportados en la literatura; además, para el almacenamiento de los resultados de la medición el sistema cuenta con una memoria no volátil, con un display gráfico para mostrarlos al usuario y comunicación Bluetooth para transferirlos a un ordenador o Smartphone. Dos aspectos competitivos del sistema son: su bajo costo en comparación con el de equipos comerciales de características similares y su facilidad de uso. El sistema por sus dimensiones y apariencia se asemeja a un teléfono celular operándose mediante un teclado matricial. Las aplicaciones de este integrado incluyen, además de la medición de bioimpedancia, análisis electroquímicos, sensores biomédicos, pruebas no destructivas en materiales, por mencionar algunas.

**Palabras Claves:** Bioimpedancia, barrido de frecuencia, bajo costo, portátil.

## 1. Introducción

En la actualidad, la medición de bioimpedancia representa una técnica simple, rápida y no invasiva que permite estimar ciertas características biológicas de un organismo a través de ciertas variables eléctricas. La bioimpedancia, como concepto eléctrico, se determina en función de dos componentes: una resistencia ( $R$ ) y una reactancia ( $X$ ), generalmente capacitiva. La resistencia se debe a la oposición que ofrece el tejido biológico al paso de una corriente eléctrica a través de él y la reactancia representa la oposición adicional debida a la capacitancia de dicho tejido y sus membranas celulares, el valor de la reactancia, además, depende de la frecuencia de la corriente eléctrica [1].

Algunas técnicas de medición no invasivas requieren de cuatro electrodos para efectuar la medición, utilizando un método de corriente-voltaje (I-V). Mediante un par se suministra una corriente al tejido y con el otro se mide el voltaje del mismo [2]. El sistema presentado en este trabajo tiene la ventaja de que sólo requiere de dos electrodos y no de cuatro para realizar la misma función. La medición de bioimpedancia para aplicaciones médicas es un tema actualmente en desarrollo, en [3] se reportan pruebas experimentales con el integrado AD5933 de Analog Devices, un chip para medición de bioimpedancia, para efectuar plestimografías.

Este artículo está estructurado de manera que en la sección 2 se describen los componentes básicos que conforman el sistema de medición y el funcionamiento del mismo a nivel usuario, explicando algunos aspectos referentes al algoritmo desarrollado; los resultados experimentales se muestran en la sección 3 y, por último, en la sección 4 se exponen las conclusiones obtenidas al término del trabajo.

## 2. Desarrollo

Este proyecto consistió en el diseño e implementación de un sistema portátil para medición de bioimpedancia basado en el integrado AD5933. Para dicho sistema se utilizó un microcontrolador PIC18F4585, una memoria serial 24LC512

que se comunica mediante el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C al igual que el AD5933, un display LCD gráfico Nokia 5110 para desplegar información, un módulo de comunicación Bluetooth HC-06, un interruptor analógico DG723 para conectar y desconectar una resistencia de calibración o la impedancia a medir y un teclado matricial para configurar el sistema de medición. El sistema en su totalidad está diseñado para trabajar con un nivel de voltaje de 3.3 V. En la figura 1 se muestra la estructura general de equipo de medición con los elementos mencionados.

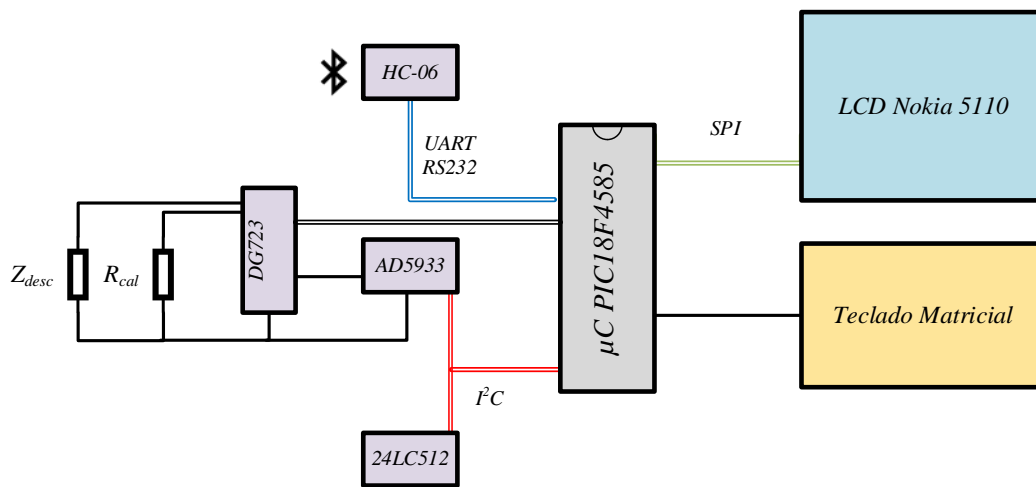


Figura 1 Estructura general del sistema.

## 2.1 Componentes del sistema

El componente principal para el sistema de medición es el integrado AD5933 de la empresa Analog Devices que, por sí mismo, es un sistema de alta precisión para medición de bioimpedancia. Para caracterizar un perfil de impedancia  $Z(\omega)$ , generalmente es requerido un barrido en frecuencia, por ende, este chip permite al usuario configurar uno definiendo tres parámetros importantes: la frecuencia de inicio, el incremento en frecuencia y el número de incrementos dentro del barrido; además de poder modificar el valor de la amplitud de la señal senoidal para realizar la medición. En la figura 2 se muestra el diagrama funcional del AD5933 [4].

Para la obtención de la impedancia, este integrado utiliza un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier, entregando la parte real (Re) y la parte imaginaria de una impedancia (Im) .

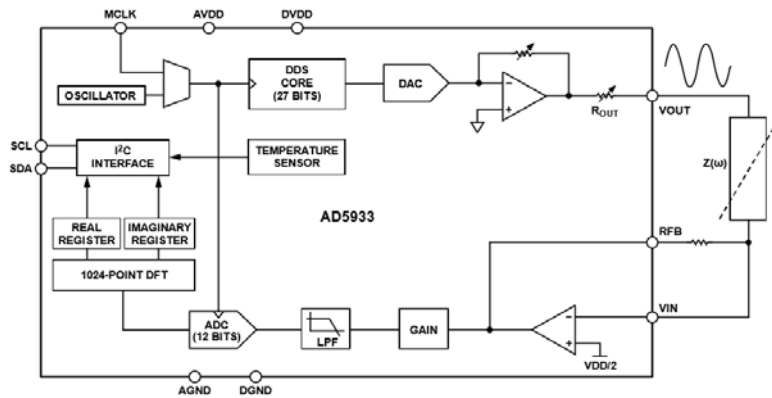


Figura 2 Diagrama funcional del AD5933.

Es importante resaltar el hecho de que la parte real y la parte imaginaria que entrega este chip no corresponden directamente a las componentes resistiva y reactiva de la impedancia bajo medición; por ello, es necesario realizar una compensación ya que el AD5933 inherentemente aporta cierta fase debido a un filtro pasa-bajas en su estructura. Para resolver este problema, es necesario efectuar el barrido de frecuencia con la resistencia de calibración  $R_{cal}$ , obtener los resultados y posteriormente hacer lo mismo con la impedancia desconocida  $Z_{desc}$ . Una vez realizados los dos barridos, es necesario realizar la compensación de fase para cada punto del barrido, ecuación 1.

$$Z\phi = \phi_{desconocida} - \nabla_{sistema} = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(Z_{desc})}{\text{Re}(Z_{desc})} \right] - \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im}(R_{cal})}{\text{Re}(R_{cal})} \right] \quad (1)$$

Donde  $\nabla_{sistema}$  es la fase que aporta el AD5933 con una resistencia de calibración  $R_{cal}$  conectada entre las terminales VIN y VOUT;  $\phi_{desconocida}$  es la fase del sistema con una impedancia desconocida  $Z_{desc}$  conectada entre las terminales VIN y VOUT y por ende,  $Z\phi$  representa la fase correcta de la impedancia bajo medición.

Por otro lado, la magnitud de la impedancia a medir está dada por ecuación 2.

$$|Z_{desc}| = \left[ K \sqrt{[\text{Re}(Z_{desc})]^2 + [\text{Im}(Z_{desc})]^2} \right]^{-1} \quad (2)$$

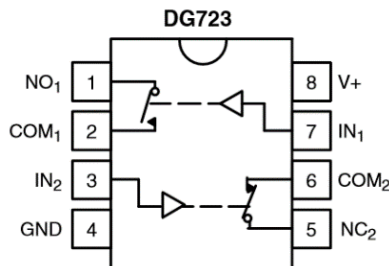
Donde  $K$  representa un factor de ganancia obtenido al utilizar la resistencia de calibración  $R_{cal}$  como lo indica la ecuación 3.

$$K = \frac{\text{Impedancia}}{\text{Magnitud}} = \frac{R_{cal}}{\sqrt{[\text{Re}(R_{cal})]^2 + [\text{Im}(R_{cal})]^2}} \quad (3)$$

Este factor  $K$  es conveniente calcularlo para cada punto del barrido, debido que las partes real e imaginaria se pueden ver afectadas por el filtro pasa-bajas del integrado. Finalmente, una vez encontrados todos los parámetros mencionados, es posible determinar las componentes resistiva y reactiva de la impedancia bajo medición ecuación 4.

$$\begin{aligned} R &= |Z_{desc}| * \cos(Z\phi) \\ X &= |Z_{desc}| * \sin(Z\phi) \end{aligned} \quad (4)$$

Dado que es necesario efectuar el barrido de frecuencia con la resistencia de calibración y posteriormente con la impedancia desconocida, el sistema incorpora un circuito integrado DG723 que contiene dos interruptores de un solo polo - un solo tiro, uno normalmente abierto y el otro normalmente cerrado, los cuales pueden ser activados mediante una misma señal digital [5]. En la Figura 3 se muestra la disposición de las terminales del integrado.



Figur 3 Circuito integrado DG723.

Cada uno de los resultados obtenidos serán almacenados por el microcontrolador en el integrado 24LC512. Este chip es una memoria EEPROM serial con capacidad de almacenar 65,535 datos de 8 bits cada uno, que además trabaja mediante el protocolo de comunicación I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit) [6].

Para la exhibición de los resultados se utilizó un display LCD gráfico Nokia 5110. Se trata de una pantalla monocromática de 84 x 48 pixeles que por su tamaño resulta ideal para este sistema de medición portátil, con capacidad de mostrar gran cantidad de información al usuario. Este display trabaja con el protocolo de comunicación SPI (Serial Peripheral Interface), por lo cual requiere pocas líneas de comunicación con el microcontrolador.

Por otro lado, se tiene un teclado matricial para el manejo del sistema de medición, el cual cuenta con 16 teclas, colocadas en una disposición de cuatro filas y cuatro columnas como se muestra en la figura 4. Diez de estas teclas son numéricas, es decir, su función es introducir cierto valor numérico en algunos de los submenús del equipo de medición. Las teclas de desplazamiento permiten al usuario seleccionar entre una y otra opción de algún menú o incrementar o decrementar alguna variable. Por último, el teclado tiene tres teclas de control: la tecla ENTER, ESC y DEL. La tecla ENTER sirve para aceptar alguna pantalla emergente o acceder a otro menú; la tecla, ESC por el contrario, se utiliza para regresar a un menú previo, y la tecla DEL permite borrar cierto valor numérico para que el usuario pueda modificarlo. Las teclas descritas dan un total de 15 dejando una disponible para implementar alguna otra función.

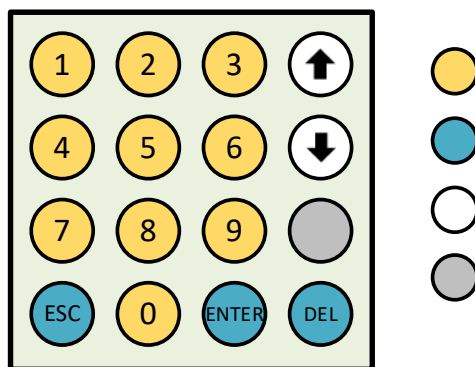


Figura 4 Teclado matricial.

El sistema, además, incorpora un módulo de comunicación Bluetooth HC-06 para transferir la información recabada de la medición ya sea a una computadora o Smartphone, para su posterior tratamiento. El HC-06 trabaja con una comunicación del tipo serial asíncrono y para su manejo son requeridos algunos comandos AT; este módulo destaca por ser de tamaño reducido y tener buenas características de transmisión y recepción que le brindan un alcance muy amplio. Su voltaje de alimentación es de 3.3 volts y exhibe un consumo de corriente de 8 mA en transmisión/recepción activa, haciéndolo ideal para aplicaciones portátiles donde la fuente de alimentación es una batería.

El último de los componentes, el microcontrolador PIC18F4585 es un integrado de la marca Microchip que tiene una memoria de programa de 32 KB, suficiente para almacenar en él el programa que se encargará de coordinar la operación de todos los elementos anteriormente descritos, en lo que será el sistema de medición propuesto. Este chip además, cuenta con características de muy bajo consumo de energía, diferentes periféricos de comunicación (UART, SPI, I<sup>2</sup>C, entre otros) y un amplio rango de voltaje de operación, de 2 a 5.5 V.

## **2.2 Funcionamiento del sistema**

Para la programación del microcontrolador se utilizó el software *mikroC PRO for PIC*, en el cual se implementaron todas las funciones necesarias para el sistema en lenguaje C intercalando algunas funciones elaboradas en lenguaje ensamblador. El programa desarrollado resulta ser muy extenso para poder explicarlo a través del código o de un diagrama de flujo. En vez de ello, la descripción del funcionamiento del sistema se realizará con base en la figura 5, en la cual, se muestran los diferentes menús con los que estará en contacto el usuario para el manejo del equipo, resaltando además, que se trata de un sistema muy amigable y sencillo de utilizar. Las líneas sólidas implican un avance por las diferentes pantallas del sistema y las líneas punteadas representan un retroceso en las mismas; aunado a dichas líneas, aparecen las teclas que provocan las posibles transiciones entre una pantalla y otra. En seguida se trata cada una de las pantallas.



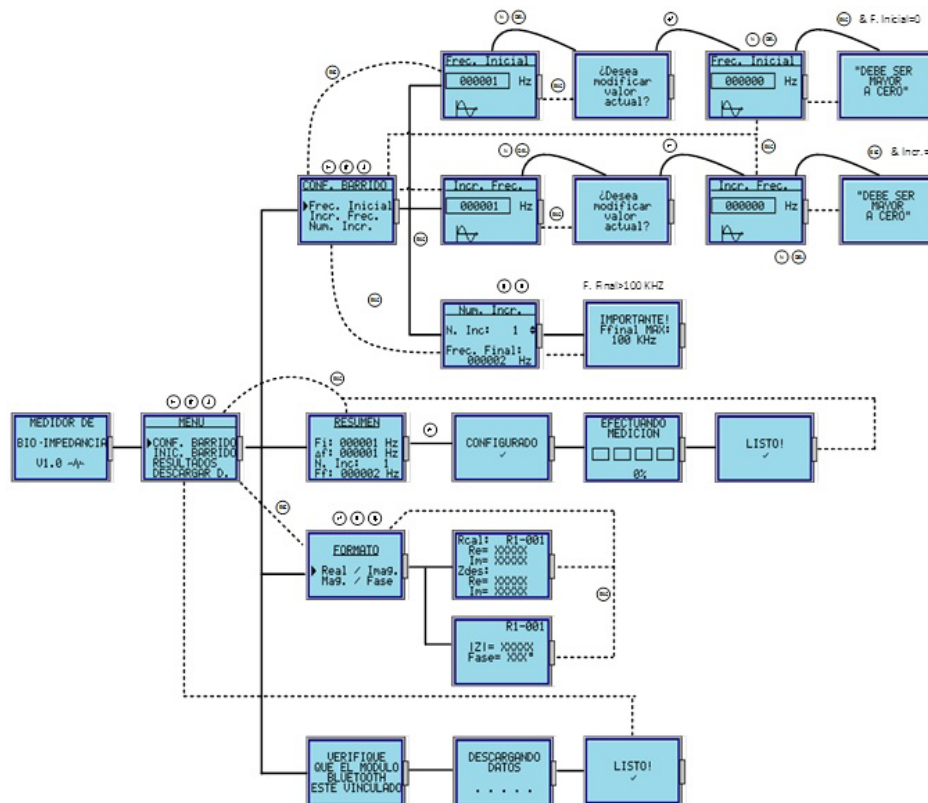


Figura 5 Diferentes pantallas del sistema de medición.

## Mensaje de inicio y menú principal

Al momento de energizar el sistema aparecerá en el display LCD un mensaje de inicio, el cual permanecerá cinco segundos en lo que el microcontrolador se encarga de configurar el módulo de Bluetooth y entablar comunicación con el resto de dispositivos. Pasados los cinco segundos se mostrará en el display el menú principal y se habilitará el teclado matricial. En el menú principal existen cuatro opciones: configurar barrido, iniciar barrido, resultados y descargar de la medición. El usuario puede elegir alguna de las opciones mencionadas utilizando las teclas de desplazamiento y acceder al submenú presionando la tecla ENTER.

## Configurar barrido (CONF. BARRIDO)

Este submenú está diseñado específicamente para que el usuario establezca las características del barrido de frecuencia necesario para efectuar la medición de impedancia. En esta pantalla aparecen tres opciones: frecuencia Inicial,

incremento en frecuencia y número de incrementos. Estas tres variables en conjunto, determinan el valor de la frecuencia final a la cual llegará el barrido dada ecuación 5.

$$F_f = F_i + n\Delta_f \quad (5)$$

Donde:

$F_f$  es la frecuencia final.

$F_i$  es la frecuencia de inicio.

$\Delta_f$  es el incremento en Hz.

$n$  es el número de incrementos del barrido.

En la primera opción (**Frec. Inicial**), el usuario puede definir la frecuencia inicial del barrido en un rango de 1 hasta 100 kHz. Al momento de presionar cualquier tecla numérica (0-9) o la tecla DEL, el sistema preguntará si se desea modificar dicho valor, en caso de querer hacerlo es necesario presionar la tecla ENTER y digitar la nueva frecuencia de inicio; si el usuario no introduce ningún número y presiona la tecla ESC aparecerá un mensaje indicándole que la frecuencia inicial debe ser mayor a 0 y automáticamente volverá a solicitarle que introduzca una cantidad adecuada. Al presionar la tecla ESC se almacenará dicho valor en la memoria EEPROM del microcontrolador, evitando perder dicha información al apagar el equipo.

La opción **Incr. Frec** tiene un funcionamiento similar a la descrita anteriormente, con la diferencia de que en ésta el usuario tiene la posibilidad de definir el incremento en Hertz entre uno y otro punto del barrido.

La última opción, **Num. Incr.**, permite al usuario (mediante las teclas de desplazamiento) establecer el número de incrementos dentro del barrido. El sistema de medición limita al usuario a definir este valor a un rango de 0 hasta 200, aunque el AD5933 permite hacer un barrido hasta con 511 puntos. Así mismo, si el número de incrementos provoca que la frecuencia final sea mayor a 100 kHz, en el display se mostrará un mensaje de advertencia y el usuario ya no podrá hacer más incrementos.

### **Iniciar Barrido (INIC. BARRIDO)**

La segunda opción del menú principal, como su nombre lo indica, comienza con el barrido de frecuencia para efectuar la medición de impedancia. Al presionar ENTER se muestra un resumen con las características del barrido previamente configuradas, lo cual, permite al usuario confirmar si dichas características son las adecuadas antes de hacer el barrido. Si la información mostrada en el resumen es correcta, el usuario podrá presionar la tecla ENTER para comenzar con la medición e inmediatamente, se mostrará un mensaje de que el AD5933 ha sido configurado exitosamente, posteriormente aparecerá otra pantalla con una barra de progreso que indica el avance del barrido de frecuencia al mismo tiempo que almacena los resultados de cada punto en la memoria EEPROM. El primer 50% de avance indica que el sistema ha realizado el barrido con la resistencia de calibración  $R_{cal}$  y el segundo 50% con la impedancia desconocida  $Z_{desc}$ . En el momento en que la barra de progreso que alcanza el 100% mostrará el mensaje "LISTO!" y volverá al menú principal.

### **Resultados de la medición (RESULTADOS)**

Esta tercera opción del menú principal, da al usuario la posibilidad de consultar los resultados obtenidos de una medición previamente realizada; cuando éste presiona la tecla ENTER aparece un submenú con dos opciones, la primera permite visualizar la información almacenada en su forma rectangular (parte real e imaginaria) y la segunda en su forma polar (magnitud y fase) ya de la impedancia medida. Al acceder a una u otra opción, el usuario puede utilizar las teclas de desplazamiento para ver los resultados de cada punto del barrido de frecuencia, dándole así un mayor dominio sobre dicha información.

### **Descargar datos (DESCARGAR D.)**

Esta cuarta y última opción del menú principal, tiene la finalidad de transferir los resultados de la medición a otro dispositivo a través de un enlace de comunicación Bluetooth mediante el circuito HC-06. Al momento en que el usuario presiona la tecla ENTER, se despliega un mensaje de que es necesario verificar que el

destino al cual se va enviar la información esté vinculado con el módulo HC-06. Una vez revisada la conexión, el usuario puede presionar la tecla ENTER para enviar los datos o regresar al menú principal en caso de no querer hacerlo. En el caso de haber presionado ENTER, aparecerá una pantalla que muestra el proceso de descarga y cuando ésta haya concluido se mostrará el mensaje “LISTO!”, regresando al usuario al menú principal.

### 3. Resultados

En la figura 6 se muestra el sistema de medición implementado físicamente con los elementos descritos a lo largo del documento. Cómo se puede apreciar, el equipo tiene un tamaño reducido, característica que lo hace sumamente práctico y portátil.

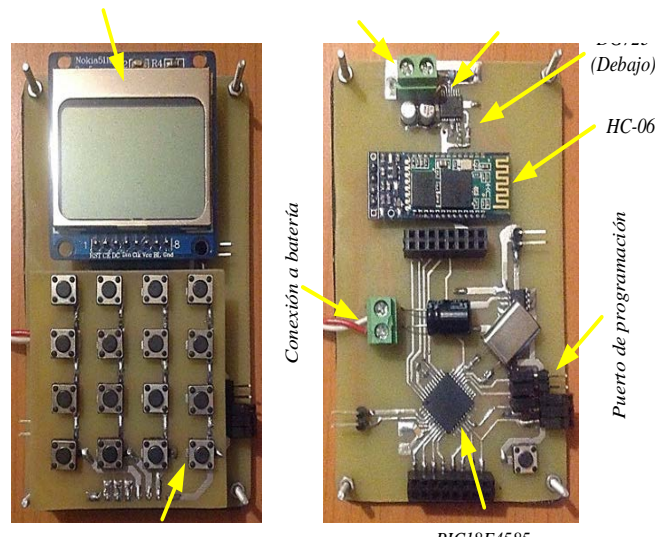


Figura 6 Sistema portátil para medición de bioimpedancia.

Para verificar el funcionamiento del sistema se realizaron pruebas a una frecuencia de 10 kHz con un circuito serie  $RC$  como el de la figura 7, donde la resistencia tiene un valor fijo de 200 k $\Omega$  y el capacitor se reemplazó con tres valores diferentes: 10 nF, 650 pF y 150 pF. A su vez, el equipo de medición emplea una resistencia de calibración de 198.8 k $\Omega$  para determinar el factor de ganancia  $K$  y con éste calcular el valor de la impedancia desconocida.

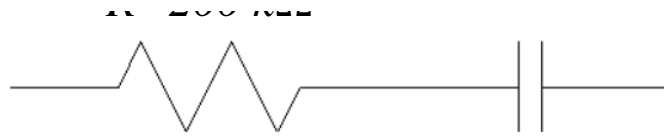


Figura 7 Circuito serie RC para prueba.

Con la resistencia de calibración el sistema entrega los siguientes valores de parte real y parte imaginaria, ecuaciones 6.

$$\begin{aligned} \text{Re} &= 0\text{xFD5E} = -674 \text{ dec} \\ \text{Im} &= 0\text{x12F0} = 4848 \text{ dec} \end{aligned} \quad (6)$$

Calculando el factor de ganancia  $K$  como se indica en (3) se obtiene ecuación 7.

$$K = \frac{1}{\frac{198.8 \text{ k}\Omega}{\sqrt{(-674)^2 + (4848)^2}}} = 1.027694327 \times 10^{-9} \quad (7)$$

Una vez calculado este parámetro, se procedió a realizar las mediciones con los tres circuitos  $RC$ . En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 1 Resultados obtenidos.

Circuito	Valores obtenidos	Magnitud $\Omega$	Fase	Parte ( $\Omega$ )	
				Real	Imaginar
 @10 kHz	Re = -622 Im = 4824	<b>Teórica</b>			
		200,006.3	-0.4559°	200,000	-1,591.55
	<b>Medida</b>				
	200,054.5	-0.5677°	200,044	-1,982.47	
	<b>%Error:</b>	0.024%	24.5	0.022	24.56
 @10 kHz	Re = -120 Im = 4835	<b>Teórica</b>			
		201,493.3	-6.9798°	200,000	-24,485.4
	<b>Medida</b>				
	201,189.7	-6.4931°	199,899	-22,751.5	
	<b>%Error:</b>	0.15	6.97	0.05	7.08
 @10 kHz	Re = -1407 Im = 4164	<b>Teórica</b>			
		226,402.1	-27.9467°	200,000	-106,103
	<b>Medida</b>				
	221,385.3	-26.5848°	187,978	-99074.8	
	<b>%Error:</b>	2.21	4.87	1.01	6.62

## **4. Conclusiones**

Se desarrolló un medidor de bioimpedancia cuyas características funcionales lo convierten en un equipo versátil apropiado para su aplicación en tareas de investigación experimental en diversos campos, tales como: el estudio de diversas patologías de la piel y su tratamiento médico, monitoreo de niveles de stress en plantas y grado de maduración de los frutos, estudio del efecto en la salud de los valores de composición corporal, entre otros.

En los resultados obtenidos se observan ligeros errores en la medición, esto se puede deber a que las pruebas realizadas teóricamente suceden a una frecuencia de 10 kHz exactamente, cuando en la práctica la frecuencia de la señal de salida puede tener una ligera desviación, lo cual modifica el valor de la reactancia. La tolerancia de los dispositivos es otro aspecto importante que puede influir de manera significativa en la medición.

Así mismo el sistema de medición desarrollado destaca por su portabilidad y capacidad de almacenamiento de datos, que lo hacen una herramienta ideal en análisis no invasivos en áreas como las mencionadas anteriormente, por lo que el equipo diseñado tiene un vasto ámbito de aplicación. En un escenario de estudio el usuario tiene la posibilidad de acudir a realizar la medición en campo, almacenar toda la información recabada y posteriormente efectuar un análisis a detalle en una computadora. Finalmente, se resalta el hecho de que el equipo de medición presentado en este trabajo es portátil, de bajo costo y fácil de usar.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] J. R. Alvero-Cruz, L. Correas Gómez, R. Fernández Vázquez, “La bioimpedancia eléctrica como método de estimación de la composición corporal: normas prácticas de utilización”. *Revista Andaluza de Medicina del Deporte*. Vol. 4. No. 4. 2011.
- [2] A. Gómez Chacón, J. Prado Olivares, J. Díaz, “Diseño de un sistema electrónico para la medición de bioimpedancia”. *Pistas Educativas*. No. 108. Octubre 2014.

- [3] J. Ferreira, F. Seoane, "Portable bioimpedance monitor evaluation for continuous impedance measurements. Towards wearable Plethysmography Applications". 35<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS.
- [4] Analog Devices, 1 MSPS, 12-Bit Impedance Converter, Network Analyzer, AD5933 datasheet.
- [5] Vishay, 1.8 V to 5.5 V, 4  $\Omega$  Dual SPST Switches, DG723 datasheet.
- [6] Microchip, 512k I2C Serial EEPROM, 24LC512 datasheet.

## **6. Autores**

Francisco Alejandro Juárez León. Es estudiante de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya. Sus áreas de interés incluyen el diseño e implementación de sistemas digitales, modelado matemático de convertidores CD-CD y sus cuestiones prácticas. Actualmente está realizando sus residencias profesionales en el Laboratorio de Energías Renovables del Instituto Tecnológico de Celaya.

Agustín Ramírez Agundis. En 2008 obtuvo el grado de Doctor en Diseño de sistemas Digitales por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Es profesor-investigador del Departamento de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Celaya, su trabajo se orienta a la instrumentación de máquinas industriales y sistemas de hardware basados en redes neuronales.

Noé de Jesús Vela Aguirre. Obtuvo su título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad de Guanajuato, posteriormente su título de Maestro en Ciencias en Eléctrica en la Universidad de Guanajuato, y su título de Doctor en Bioingeniería con énfasis en Bioelectrónica por la Universidad Politécnica de Valencia, España. Actualmente se desempeña como docente e investigador en el Instituto Tecnológico de Celaya.

# **SÍNTESIS ELECTRÓNICA DE UNA CÉLULA B EMPLEANDO OPAMPS**

***V. Fernández Carreón***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica  
*viry\_fc@hotmail.es*

***J. M. Munoz Pacheco***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica  
*viry\_fc@hotmail.es*

***O. G. Félix Beltrán***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica  
*viry\_fc@hotmail.es*

***E. Zambrano Serrano***

Departamento de Matemáticas Aplicadas IPICYT  
*viry\_fc@hotmail.es*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la implementación electrónica que describe el comportamiento de la célula  $\beta$  pancreática según el modelo matemático propuesto por Pernarowsky. Este modelo permite conocer el comportamiento de una sola célula estando en fase activa e inactiva y presentando los distintos tipos de oscilaciones que se generan en la membrana celular conocidas como Bursting Electrical Activity (BEA). A partir de este modelo matemático se plantea su implementación electrónica utilizando amplificadores operacionales de voltaje (OpAmps) y multiplicadores analógicos. Utilizando un número de componentes electrónicos reducido debido a configuraciones diferenciales de OpAmps, el diseño propuesto es capaz de emular el comportamiento dinámico de la célula  $\beta$ .



Las simulaciones realizadas con el software SPICE concuerdan con el modelo teórico validando el diseño.

**Palabra(s) Clave(s):** Bursting, célula beta, Pernarowsky, OpAmp.

## 1. Introducción

El páncreas es una glándula mixta que contiene un tejido exocrino y un tejido endocrino, este último está compuesto por miles de conjuntos de células, agrupadas en conjuntos conocidos como islotes de Langerhans [1, 2]. Entre las células que componen los estos islotes se encuentran las células  $\beta$  en un 70%, cuya función es la de producir y segregar insulina en el torrente sanguíneo cuando los niveles de glucosa aumentan con el objetivo de estimular al hígado a absorberla y así, regular los niveles de azúcar en la sangre [2, 3]. Las células  $\beta$  se encuentran rodeadas por una membrana, que cuando se sincronizan las células, genera un potencial eléctrico con oscilaciones complejas. Estas se dividen en dos tipos de comportamiento; el primero se caracteriza por tener una fase activa con una escala de tiempo rápida, y el otro por tener una fase pasiva o silenciosa con una escala de tiempo lenta [3, 4]. A la suma de ambos comportamientos se le conoce como bursting cuadrado, el cual da origen al Bursting Electrical Activity (BEA), actividad encargada de la función normal y sana del páncreas [3, 4]. En caso contrario, uno de los padecimientos más comunes a nivel mundial que podría desarrollarse es la aparición de la diabetes. A grandes rasgos, definida cuando las células  $\beta$  no generan BEA.

Existen diversos modelos matemáticos que describen el comportamiento de la célula  $\beta$  [6, 7], entre ellos el propuesto por Pernarowsky reportado en la Ref. [5] es el más ampliamente utilizado por su facilidad de interpretación de la dinámica no lineal del páncreas. Este modelo se compone por tres ecuaciones diferenciales acopladas, que al variar algunos de sus parámetros se obtienen diferentes tipos de bursting, entre ellos el bursting cuadrado.

Es bien conocido que una parte importante de la validación de los modelos matemáticos es la reproducción experimental del fenómeno que modelan [1-13]. Una de las aproximaciones para realizar la validación anterior es mediante la

implementación electrónica del modelo matemático. Este tipo de aproximación es ampliamente utilizada para validar modelos de fenómenos complejos tales como el caos presente en sistemas dinámicos no lineales. Además de que la implementación electrónica de los modelos matemáticos permite estudiar las relaciones entrada-salida (excitaciones y respuestas) de un sistema [8-10]. En el caso específico de la célula  $\beta$  estudiada en este trabajo, podría ser la obtención de un laboratorio virtual electrónico que de oportunidad de analizar diversas condiciones (padecimientos) de la célula  $\beta$  pancreática [11-12].

Por lo tanto en este trabajo se propone el diseño de un circuito electrónico basado en amplificadores operaciones de voltaje (OpAmps) y multiplicadores analógicos para emular el comportamiento dinámico de la célula  $\beta$ . En específico se utiliza la metodología de computación analógica para implementar las tres ecuaciones diferenciales del modelo matemático de Pernarowsky. El diseño propuesto utiliza esquemas diferenciales para reducir el conteo de componentes electrónicos activos, los cuales permitieron reducir el número a catorce cuando se compara contra los veinticuatro de otros diseños antes publicados [13]. Además, se presentan los resultados de la aplicación de las técnicas de escalamiento en amplitud y escalamiento en frecuencia sobre el modelo de Pernarowsky. Lo anterior nos permite controlar la amplitud del BEA, así como la escala de tiempo.

En la sección 2 se describe el modelo matemático Pernarowsky y las condiciones bajo las cuales se produce bursting cuadrado. En la sección 3 se explican los pasos de diseño electrónico para la implementación electrónica de la célula  $\beta$ . La sección 4 muestra los resultados de la simulación a nivel circuito electrónico utilizando SPICE. Finalmente, la sección 5 resume las conclusiones.

## **2. Modelo matemático de la célula $\beta$**

Las células  $\beta$  presentan oscilaciones complejas en el potencial de la membrana denominado bursting. El bursting característico de la célula beta en estado activo se denomina **bursting cuadrado** y existen varios modelos matemáticos que lo describen, entre los cuales se encuentra el modelo propuesto por Pernarowsky [6, 7]. Este modelo permite simular el comportamiento dinámico de una sola célula  $\beta$

dentro del islote de Langerhans y se compone de tres ecuaciones diferenciales acopladas. Estas se pueden dividir en dos subsistemas, uno rápido y uno lento [9, 6], donde el subsistema rápido está dado por:

$$\begin{aligned}\dot{u} &= f(u) - \omega - c, \\ \dot{\omega} &= \omega_{\infty}(u) - \omega,\end{aligned}$$

Mientras que el subsistema lento es descrito por

$$\dot{c} = \epsilon(h(u) - c). \quad (1)$$

Donde  $u$  es el potencial de la membrana,  $\omega$  es el voltaje del canal de activación de potasio y  $c$  la concentración de sustancias que regulan el BEA, tales como calcio intracelular, calcio en el retículo endoplásmico y ADP. El modelo matemático de Pernarowsky presenta funciones no-lineales de las cuales se deriva el bursting. Estas no linealidades son polinomios de tercer grado dependientes de la variable  $u$ , representados por las funciones  $f(u)$ ,  $\omega_{\infty}(u)$  y  $h(u)$ , como se muestran en (2). Anteriormente se ha propuesto utilizar funciones lineales a trozos (PWL) para estudiar la dinámica no lineal de un sistema complejo [12].

$$\begin{aligned}f(u) &= -\frac{\alpha}{3}u^3 + \alpha\hat{u}u^2 + (1 - \alpha(\hat{u}^2 - \eta^2))u \\ \omega_{\infty}(u) &= \left(1 - \frac{\alpha}{3}\right)u^3 + \alpha\hat{u}u^2 - (2 + \alpha(\hat{u}^2 - \eta^2))u - 3 \\ h(u) &= \beta(u - u_{\beta})\end{aligned} \quad (2)$$

Considerando el siguiente conjunto de valores para los parámetros en (1),  $\alpha = \frac{1}{4}$ ,  $\eta = \frac{3}{4}$ ,  $\hat{u} = \frac{3}{2}$ ,  $\beta = 4$ ,  $u_{\beta} = -0.954$ ,  $\epsilon = 0.0025$  [5]; se obtiene mediante MATLAB el comportamiento dinámico de las variables de estado  $\dot{u}$ ,  $\dot{\omega}$  y  $\dot{c}$ , el cual presenta las oscilaciones conocidas como bursting (figuras 1 y 2), donde la variable de estado  $u$  es la que corresponde a las oscilaciones de la membrana de la célula.

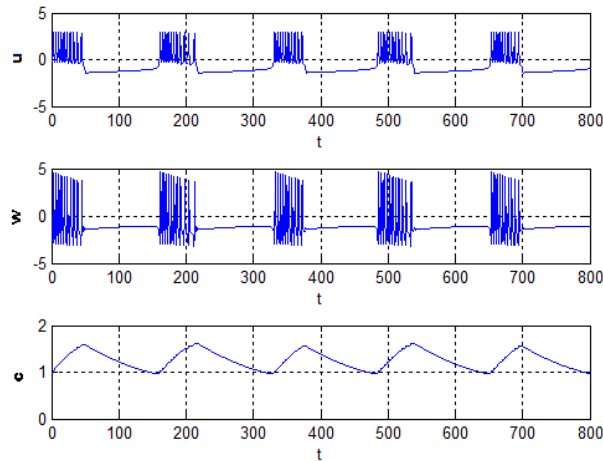


Figura 1 Bursting característico de una célula  $\beta$  activa y sana.

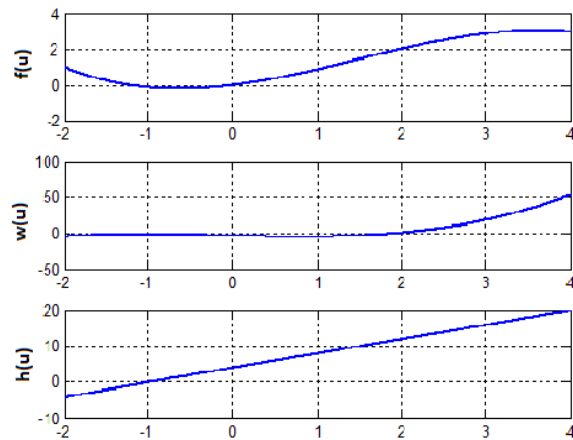


Figura 2 Comportamiento de las funciones en (2).

Una de las características más importantes del modelo propuesto por Pernarowsky es la dinámica tan diversa que presenta ante cambios en algunos de los valores de sus parámetros, ante estos cambios se presentan cinco tipos de bursting denominados beating, bursting parabólico, semiparabólico y tapered [1] (figura 3). El bursting cuadrado (figura 3a) se caracteriza por una fase activa con picos cuyos máximos y mínimos locales son casi constantes y tienen un valor por encima de la fase silenciosa. El beating (figura 3a), en comparación con el bursting cuadrado, carece de fase silenciosa pero es igual en magnitud. El bursting parabólico (figura 2b) tiene como característica principal un perfil que asemeja una parábola. El bursting semiparabólico (figura 3c) se caracteriza por sus mínimos

locales en el spiking que se encuentran por debajo de la fase silenciosa. Finalmente el tapered tienen una fase activa sobre amortiguada (figura 2d).

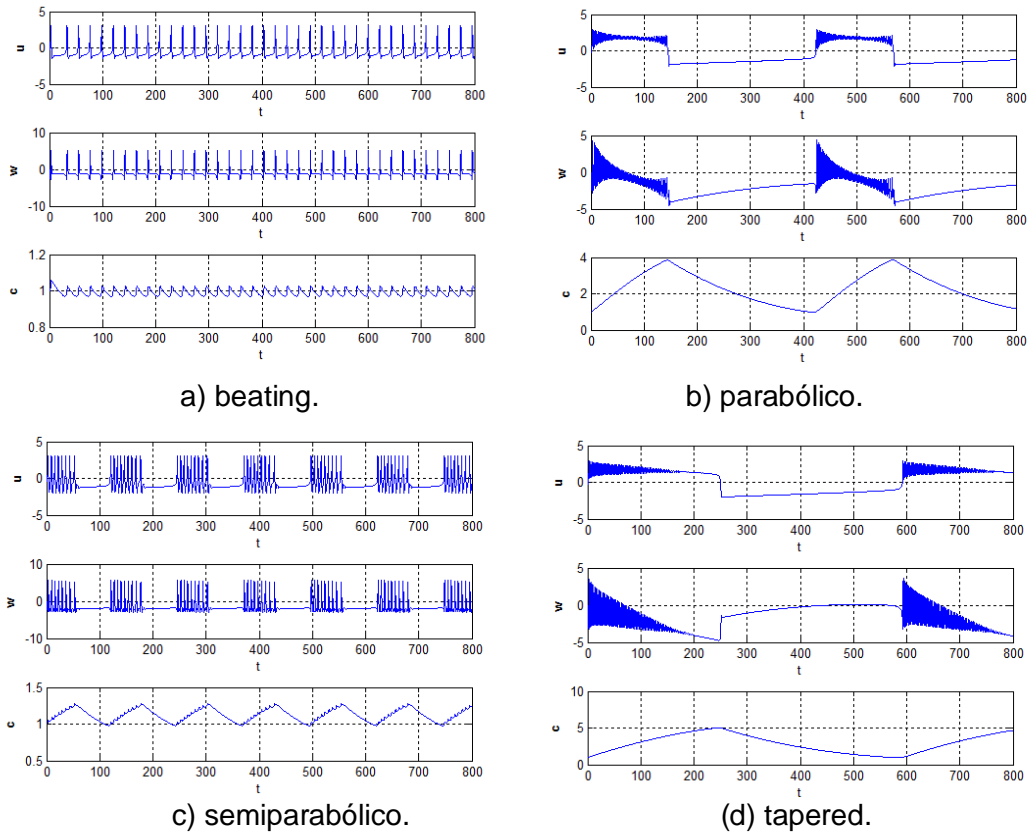


Figura 3 Diferentes tipos de bursting.

Para el caso de los diferentes tipos de oscilaciones se varían los parámetros  $\eta$  y  $\hat{u}$  que toman distintos valores para cada tipo de bursting (tabla 1).

Tabla 1 Parámetros de  $\eta$  y  $\hat{u}$  para obtener los distintos tipos de bursting.

$\eta$	$\hat{u}$	Tipo de oscilación
3/4	3/2	Bursting de onda cuadrada
1	3/2	Beating
3/4	1	Bursting de amplitud parabólica
5/4	1	Bursting semiparabólico
1/2	9/4	Tapered

El bursting también depende de escalas de tiempo distintas, esta escala de tiempo es representada en el sistema de ecuaciones (1) por  $\epsilon$ , y toma el valor de 0.0025.

### 3. Implementación electrónica usando OpAmps

En este trabajo se diseñan tres circuitos electrónicos que representan las tres variables de estado de la ecuación (1). Estos circuitos a su vez contienen otros sub circuitos que representan las no linealidades del sistema dadas en la ecuación (2).

Dada la respuesta de las ecuaciones no lineales (ver figura 2) donde  $\omega_\infty(u)$  y  $h(u)$  tienen una ganancia de hasta 50 y 20 unidades, respectivamente. Suponiendo que se traslada directamente a un circuito electrónico, este tendría una salida de voltaje de 50V y 20V, respectivamente, para cada ecuación, la cual es una ganancia muy grande y no apta para su implementación física, por lo que se propone escalar las funciones.

$k_1=1$ ,  $k_2=5$  y  $k_3=2$ , representan los parámetros de escalamiento en amplitud para las ecuaciones 3.

$$\begin{aligned} x &= \frac{u}{k_1} & u &= xk_1 \\ y &= \frac{\omega}{k_2} & \omega &= yk_2 \\ z &= \frac{c}{k_3} & c &= zk_3 \end{aligned} \quad (3)$$

Para el nuevo sistema de ecuaciones se tienen nuevos nombres para las variables de estado, así como para las ecuaciones no lineales, siendo  $x$ ,  $y$  y  $z$  las nuevas ecuaciones  $u$ ,  $\omega$  y  $c$ , respectivamente. El resultado del proceso de escalamiento son unas nuevas ecuaciones que describen las variables de estado dadas en ecuaciones 4.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\left(-\frac{a}{3}(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 + (1 - a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1)\right) - (yk_2) - (zk_3)}{k_1}, \\ \dot{y} &= \frac{\left(\left(1 - \frac{a}{3}\right)(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 - (2 + a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1) - 3\right) - (yk_2)}{k_2}, \end{aligned}$$

$$\dot{z} = \frac{\epsilon \left( (\beta((xk_1) - u_\beta)) - (zk_3) \right)}{k_3} \quad (4)$$

De igual forma que el modelo original, las nuevas variables de estado presentan no linealidades representadas por las ecuaciones 5.

$$f(x) = \frac{-\frac{a}{3}(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 + (1 - a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1)}{k_1},$$

$$y(x) = \frac{\left(1 - \frac{a}{3}\right)(xk_1)^3 + a\hat{u}(xk_1)^2 - (2 + a(\hat{u}^2 - \eta^2))(xk_1) - 3}{k_2},$$

$$h(x) = \frac{\beta \left( (xk_1) - u_\beta \right)}{k_3} \quad (5)$$

Una vez sustituidos todos los parámetros de las ecuaciones (4) y (5) para una célula  $\beta$  activa se obtienen las ecuaciones 6 y 7 [5].

$$\dot{x} = (f(x)) - 5y - 2z,$$

$$\dot{y} = (y(x)) - y,$$

$$\dot{z} = \epsilon((h(x)) - z). \quad (6)$$

$$f(x) = -\frac{1}{12}x^3 + \frac{3}{8}x^2 + \frac{37}{64}x,$$

$$y(x) = \frac{11}{60}x^3 + \frac{3}{40}x^2 - \frac{31}{64}x - \frac{3}{5},$$

$$h(x) = 2x + 1.0908 \quad (7)$$

Dadas las nuevas funciones escaladas, se procede a realizar la implementación electrónica, para esto se realiza un diagrama a bloques de manera general (figura 4) que describe las ecuaciones 6.

El diagrama a bloques de la figura 4 muestra los bloques principales. Estos incluyen tres funciones no lineales  $f(x)$ ,  $y(x)$  y  $h(x)$ , así como tres bloques integradores, “1/s”, para obtener la solución de las derivadas de las variables de estado  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , descritas por las ecuaciones (6). Finalmente un bloque de ganancia “epsilon” y tres bloques sumadores algebraicos.

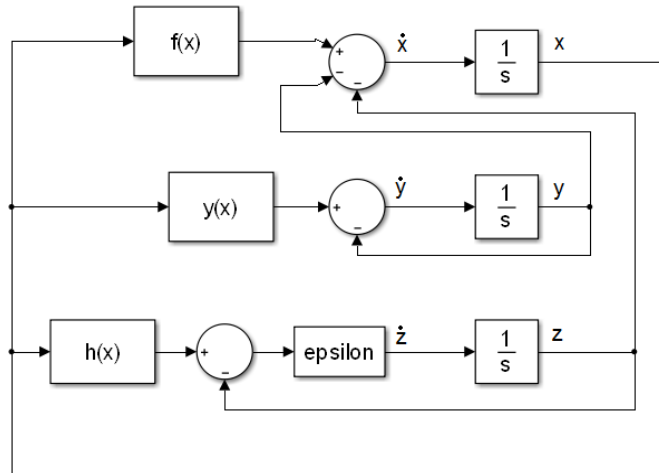


Figura 4 Diagrama de bloques de las variables de estado en (6).

Para la implementación electrónica de los bloques de la figura 4 se utilizan topologías con amplificadores operacionales de voltaje. En este contexto, los integradores, “1/s”, son diseñados con la configuración típica de integrador inversor. Los sumadores de tres entradas se diseñan con la configuración de sumador inversor, mientras que en los casos donde solo se tienen dos entradas al sumador, se utiliza una configuración de amplificador diferencial.

En lo que respecta a la implementación de las ecuaciones no lineales  $f(x)$ ,  $y(x)$  y  $h(x)$ , se propone lo siguiente: en el caso de  $f(x)$ , dado que es un polinomio de tercer grado, posee un término cubico y uno cuadrado, los cuales serán representados por circuitos multiplicadores de voltaje (figura 5). Además la función  $f(x)$  tiene tres ganancias  $G1$ ,  $G2$  y  $G3$  las cuales se obtienen mediante la configuración de amplificador inversor (figura 6). Finalmente se suman los términos usando un amplificador en configuración sumador inversor.

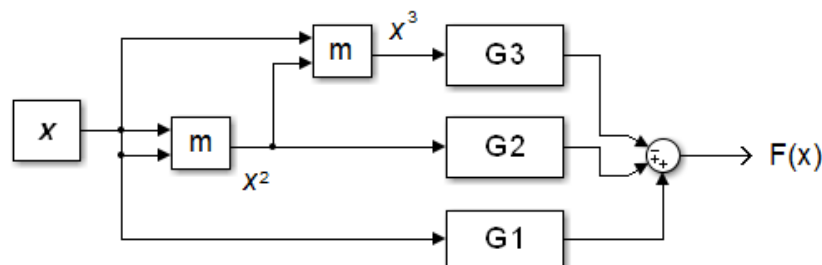


Figura 5 Diagrama de bloques para la función no lineal  $f(x)$ .



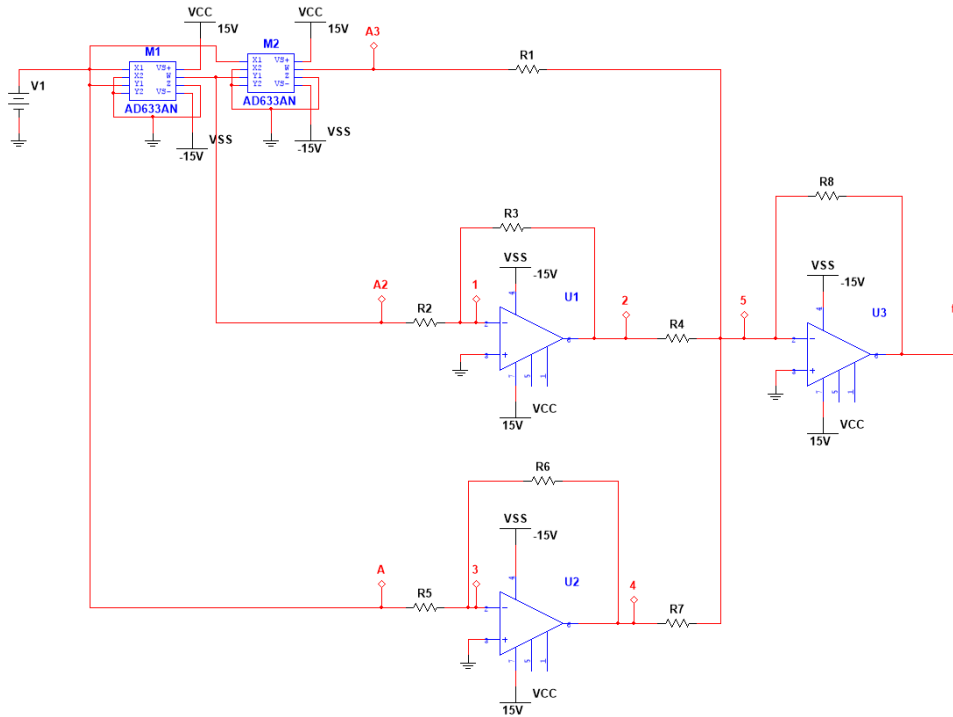


Figura 6 Circuito electrónico de  $f(x)$  utilizando opamps y multiplicadores.

En forma análoga al caso de la función  $f(x)$ , se diseñan las funciones  $y(x)$  y  $h(x)$  (7). Para la función  $y(x)$  se utilizan dos multiplicadores de voltaje, cuatro ganancias  $G4, G5, G6, G7$ , y un sumador como se muestra en la figura 7. En específico,  $G4$  no tiene una entrada debido a que representa una constante y esta se diseña mediante una fuente de voltaje independiente  $V1$ . La síntesis del diagrama a bloques de la figura 6 utilizando dispositivos electrónicos se muestra en la figura 8. Para el caso de  $h(x)$  el diagrama a bloques y su equivalente con dispositivos electrónicos se muestra en la figuras 9 y 10, respectivamente.

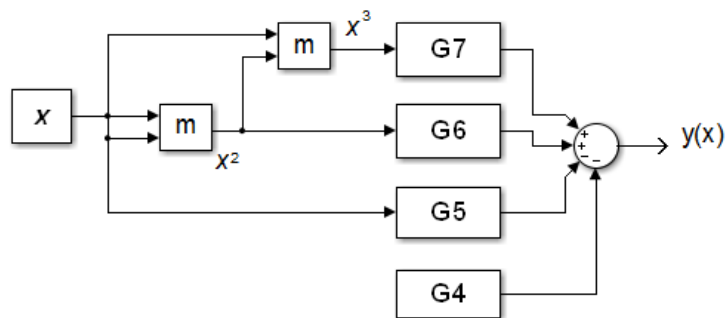


Figura 7 Diagrama de bloques para la función no lineal  $y(x)$ .

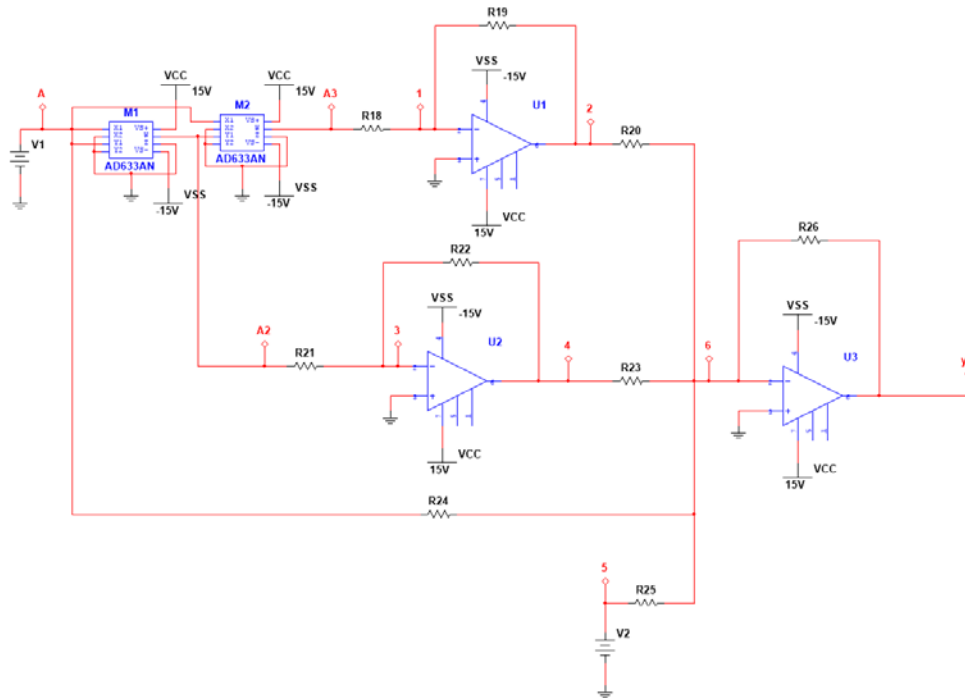


Figura 8 Circuito electrónico de  $y(x)$  utilizando opamps y multiplicadores.

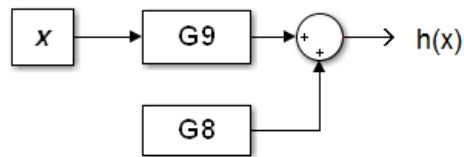


Figura 9 Diagrama de bloques para la función no lineal  $h(x)$ .

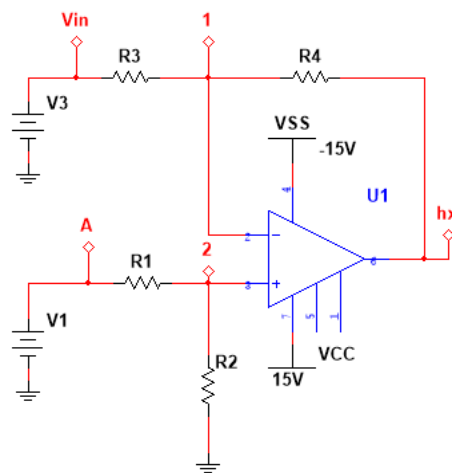


Figura 10 Circuito electrónico de  $h(x)$  utilizando opamps.

Los diagramas de bloques que describen las ecuaciones no lineales (figuras 5, 7 y 9), incluyen los bloques G1, G2,..., G9, los cuales representan las ganancias de los amplificadores de voltaje de acuerdo con las ecuación (7) se obtiene la Tabla 2.

Tabla 2 Valores de las ganancias para las ecuaciones no lineales en figuras 4, 6, 8.

Ganancias	Valor	Ganancias	Valor
G1	37/64	G5	-31/64
G2	3/8	G6	3/40
G3	-1/12	G7	11/60
G4	-3/5	G8	1.0908
G5	-31/64	G9	2

#### 4. Resultados

Una vez que los bloques  $f(x)$ ,  $y(x)$  y  $h(x)$  de la figura 4 han sido diseñados, entonces la síntesis con circuitos electrónicos del diagrama a bloques de la figura 4, el cual describe una célula  $\beta$ , se muestra en la figura 11.

Una vez descritos los circuitos que describen las funciones no lineales en (7) (figuras 6, 8, 10), se obtienen las funciones de transferencia en (8) utilizando análisis de circuitos usando Leyes de Kirchhoff.

$$\begin{aligned}
 f(x) &= -R8 \left( \frac{A^3}{R1.100} - \frac{R3.R4.A^2}{R2.10} - \frac{R6.R7.A}{R5} \right), \\
 y(x) &= -R26 \left( -\frac{R19.R20.A^3}{R18.100} - \frac{R22.R23.A^2}{R21.10} + R24.A + 0.6V.R25 \right), \\
 h(x) &= \frac{R38}{R37} (A - 5V).
 \end{aligned} \tag{8}$$

De forma similar se obtuvieron las funciones de transferencia para las variables de estado  $x$ ,  $y$  y  $z$  (figura 11)

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= - \left( \left( \frac{R11.R12}{R10.R14.R15.C1} - \frac{R11.R12}{R14.R15.C1} \right) y - \frac{R12}{R14} f(x) + \left( \frac{1}{R16.C1} z \right) \right), \\
 \dot{y} &= - \frac{1}{R31.C2} \left( \frac{R28}{R27} y - \frac{R28}{R27} y(x) \right) \\
 \dot{z} &= - \frac{1}{R45.C3} \left( \frac{R42}{R41} z - \frac{R42}{R41} h(x) \right).
 \end{aligned} \tag{9}$$

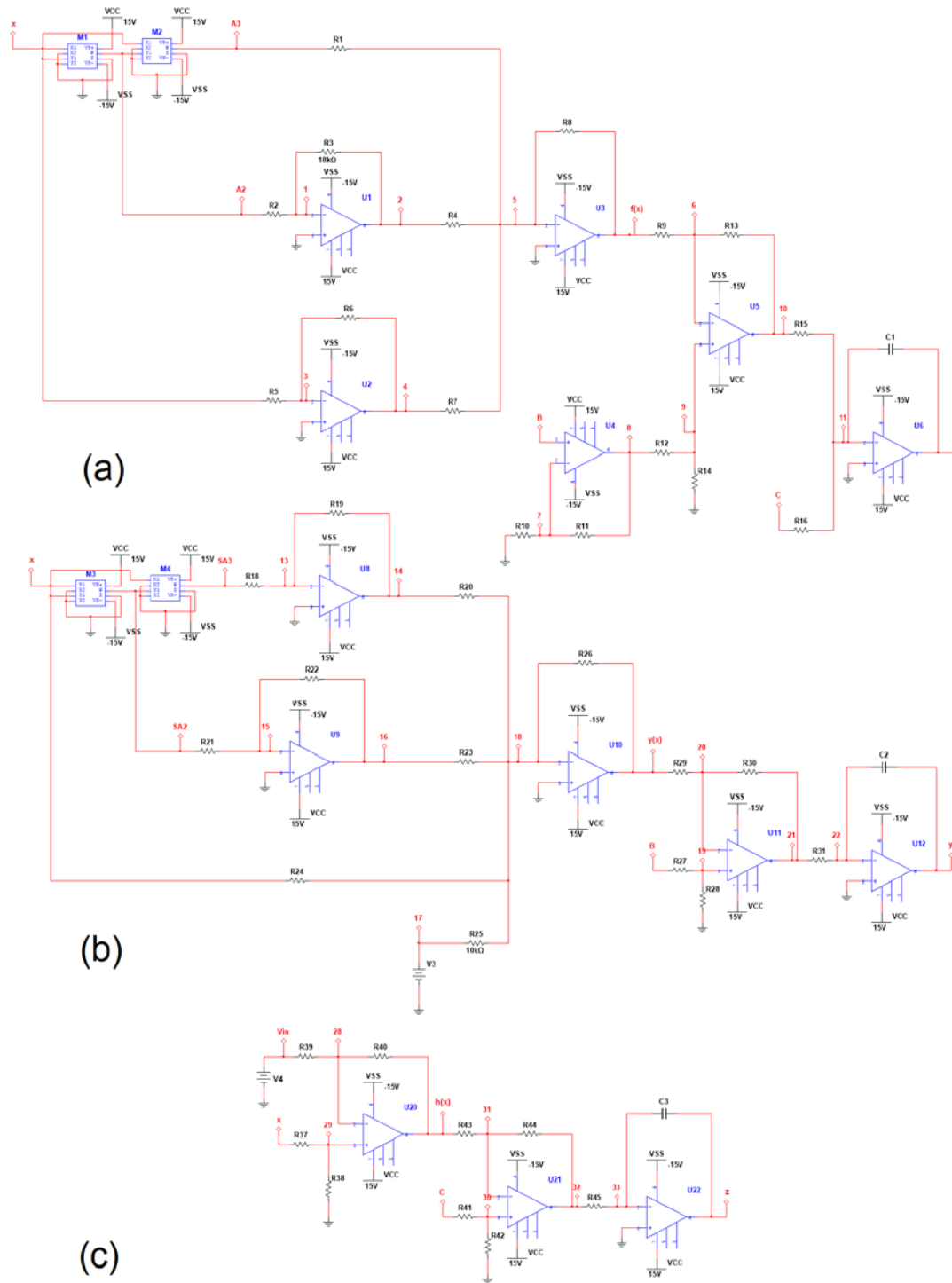


Figura 11 Circuito electrónico propuesto para emular la célula  $\beta$  en (6).

Dadas las ecuaciones (8) y (9) se obtuvieron los valores de los componentes electrónicos considerando los parámetros  $\alpha$ ,  $\eta$ ,  $u_{\beta}$ ,  $\hat{u}$ ,  $\beta$ , y  $\varepsilon$  de la célula  $\beta$  activa (tabla 3).

Tabla 3 Valores de los componentes de la implementación electrónica.

Componentes	Valor k $\Omega$
R4, R7, R8, R9, R10, R12, R13, R14, R20, R23, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R37, R39	10
R1	1.2
R2	4.8
R3, R22	18
R5	640
R6	370
R18	6
R19	110
R21	24
R24	20.6
R38, R40	20

En la figura 12 se muestra el comportamiento de las funciones  $f(x)$ ,  $y(x)$  y  $h(x)$  que tienen una salida de voltaje de entre 10 y 11 V, lo cual es aceptable para un sistema físico, de igual forma para las nuevas variables de estado conformadas por las ecuaciones (6) se tienen los tres circuitos acoplados que representan el comportamiento de la célula  $\beta$  activa (figura 13).

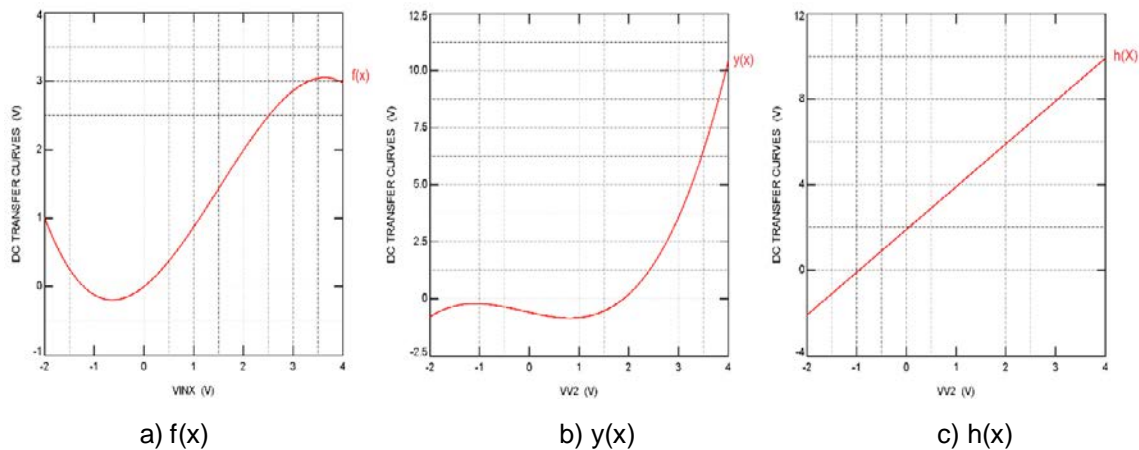


Figura 12 Comportamiento de las ecuaciones al realizar un barrido en DC de -2 a 4 V.

Como se mencionó en las secciones anteriores existen diferentes tipos de bursting que se presentan al variar los parámetros  $\eta$  y  $\hat{u}$ , de las ecuaciones propuestas por Pernarowsky [5]. Estos parámetros en el circuito se representan por los

componentes R2, R6, R21 y R24 (figuras 6 y 8), los cuales varían dependiendo del tipo de oscilación que se quiera mostrar. Para que el circuito muestre el bursting característico de la célula beta (BEA) (figura 1), los componentes muestran los siguientes parámetros: R2= 4.8 k $\Omega$ , R6= 370 k $\Omega$ , R21= 24 k $\Omega$  y R24= 20.6 k $\Omega$ .

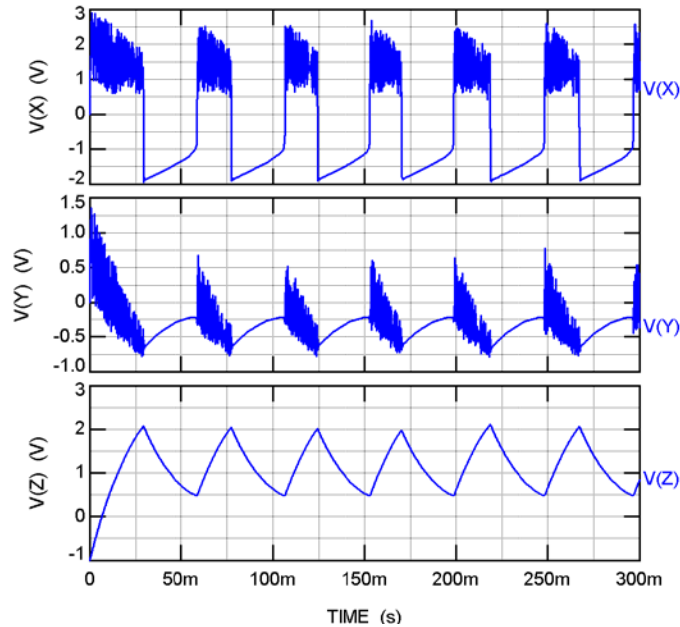


Figura 13 Oscilaciones eléctricas en voltaje para célula  $\beta$  en figura 10 bursting cuadrado.

## 5. Conclusiones

Se han presentado tres circuitos electrónicos acoplados que describen el comportamiento de una célula beta a partir del modelo matemático de Pernarowsky usando amplificadores operacionales y multiplicadores analógicos. Se demostró que los tres circuitos realizados son capaces de emular correctamente la dinámica no lineal de la célula beta y que los distintos comportamientos se pueden obtener al variar pocos parámetros de los componentes que lo describen. Los circuitos resultantes han sido implementados utilizando dispositivos comerciales tales como amplificadores operacionales LM741 y con multiplicadores AD633. Se demostró que mediante el empleo de esquemas diferenciales es posible reducir el número de componentes electrónicos

activos, los cuales permitieron reducir el número a catorce en comparación a otras aproximaciones.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] M. Pernarowsky, "Fast subsystem bifurcations in a slowly varying Liénard system exhibiting bursting". *SIAM Journal on Applied Mathematics*. Vol. 54. Nº 3. 1994. Pp. 814-832.
- [2] C. P. Olvera Granados, G. E. Leo Amador y H. L. Hernández Montiel, "Pancreas y célula beta: Mecanismos de diferenciación, morfogénesis y especificación celular endocrina, ¿Regeneración?". *Mediagráfica Artemisa*. Vol. 65. 2008.
- [3] C. P. Olvera Granados, G. E. Leo Amador, H. L. Hernández Montiel, "Pancreas y célula beta: Mecanismos de diferenciación, morfogénesis y especificación celular endocrina, ¿Regeneración?". *Mediagráfica Artemisa*. Vol. 65. 2008.
- [4] E. Jones y A. Manson, "Lo esencial en célula y genética". Elsevier. 2003.
- [5] R. M. Miura, "Analysis of excitable cell models". *Journal of Computational and Applied Mathematics*. Vol. 144. 2002. Pp. 29-47.
- [6] P. Georgiou y C. Toumazou, "A silicon pancreatic beta cell for diabetes". *IEEE Trans. Biomedical Circuits Syst.* Vol. 1. Nº 1. 2007. Pp. 39-49.
- [7] I. Pagkalos, P. Herrero, C. Toumazou, P. Georgiou, "Bio-inspired glucose control in diabetes based on an analogue implementation of a beta cell model". *IEEE Trans. Biomedical Circuits Syst.* Vol. 8. Nº 2. 2014. Pp. 186-195.
- [8] M. Pernarowski, "Fast and slow subsystems for a continuum model of bursting activity in the pancreatic islet". *SIAM Journal on applied mathematics*. 1988. P. 58.
- [9] M. Pernarowsky, R. M. Miura, J. Kevorkian, "The Sherman-Rinzel-Keizer Model for Bursting Electrical activity in the Pancreatic Beta-Cell". *Springer Lecture Notes in Biomathematics*. Nº 92. 1991. Pp. 34-53.

- [10] K. Wedgwood, "The synchronization of pancreatic beta-cell by gap junction coupling". Mathematics MSc Final Report Summer. 2009.
- [11] R. Griffiths, "Return map characterizations of singular solutions for a model of bursting with two slow variables". Ph.D. Thesis. Montana State. 2003.
- [12] J. M. Muñoz Pacheco, L. C. Gomez Pavon, O. G. Félix Beltrán, A. L. Ramos, "Determining the Lyapunov spectrum of continuous-time 1D and 2D multiscroll chaotic oscillators via the solution of m-PWL variational equations". *Abstract and Applied Analysis*. Vol. 2013. Pp. 1-11. 2013.
- [13] L. J. Ontañón García, E. Campos Cantón, J. Sánchez Sahagún, I. Campos Cantón, "Electronic implementation of a pancreatic  $\beta$ -cell". XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA. 2014.

## **7. Autores**

V. Fernández-Carreón es egresada de la Licenciatura en Electrónica en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, con intereses en la investigación del Caos, área de comunicaciones, control y procesamiento de señales. Actualmente se encuentra en el proceso del ingreso a la Maestría en Ingeniería en Electrónica de la BUAP.

Jesús Manuel Muñoz-Pacheco obtuvo los grados de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias, ambos en la especialidad de Electrónica, del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en el 2005 y 2009 respectivamente. Del 2009 al 2013 fue Profesor-Investigador de Tiempo Completo en la Universidad Politécnica de Puebla, y desde mediados de 2012 se unió a la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla como profesor investigador titular "A". Sus intereses de investigación incluyen síntesis sistemática, modelado de comportamiento y simulación de circuitos y sistemas lineales y no-lineales; osciladores caóticos, sincronización de caos; y aplicaciones del caos. El Dr. Muñoz-Pacheco es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI-CONACyT) nivel 1 y sirve como miembro regular del consejo editorial y revisor técnico de revistas científicas indexadas con factor de impacto.



O. G. Félix-Beltrán es Doctora en Ciencias (Física) y obtuvo su grado en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el 2003. Del 2003 al 2005 fue Profesor-Asociado en la Universidad Autónoma de México, desde 2005 a la fecha se encuentra laborando en la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla como Profesor Investigador. Félix-Beltrán pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI-CONACyT) nivel 1. Una de las líneas de investigación en que la investigadora trabaja es en sistemas no lineales (caos).

E. Zambrano-Serrano obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el 2012. Actualmente, es candidato a Doctor en el Departamento de Matemáticas Aplicadas del IPICYT; y encuentra realizando una estancia de investigación científica en el Centro para el Caos y las Redes Complejas en City University de Hong Kong bajo la dirección del Prof. Dr. Guanrong Chen. Sus intereses de investigación incluyen osciladores caóticos, sincronización de caos; y sistemas caóticos de orden fraccional.

# MONITOREO INTERACTIVO CON CONTROL DEL CONSUMO ELÉCTRICO CON FINES DE USO EFICIENTE Y AHORRO ENERGÉTICO

***Rubén Herrera Galicia***

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez  
*h\_galicia24@hotmail.com*

***Eliasin Camacho Cruz***

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez  
*eliasincc@hotmail.com*

***Fernando Alexis Hernández López***

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

***Adriana del Carmen Pérez Zamora***

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

***Ernesto Gómez Ruiz***

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

## **Resumen**

En el presente trabajo se propone un sistema que monitorea el consumo de energía eléctrica de los electrodomésticos de una casa residencial y se presentan los resultados al usuario para que los aproveche con fines de uso eficiente y ahorro energético. El sistema es una herramienta útil para planear cambios en el horario de uso y mejorar el perfil de demanda. La finalidad de los cambios es evitar el consumo en horas pico y mejorar el factor de carga. La respuesta a la demanda favorece al usuario, con un ahorro en el pago del servicio, y favorece a la empresa del suministro de energía eléctrica, con un menor costo de producción.

La intención es disponer de un sistema que registre información sobre costos considerando la tarifa horaria y ello permita al usuario hacer ajustes del consumo de la energía.

**Palabras Claves:** ahorro energético, red inteligente, respuesta a la demanda, uso eficiente de la energía.

## **1. Introducción**

Respuesta a la demanda es el cambio en el comportamiento del usuario, durante el uso de la electricidad, reflejado en la reestructuración de la secuencia de encendido de los electrodomésticos con fines de evitar las horas pico y lograr una distribución más uniforme del consumo eléctrico, con un ahorro en el pago del servicio, gracias al precio variable de la tarifa horaria ofertado por la compañía prestadora del servicio. En las redes inteligentes el precio de la electricidad es esencial para guiar el comportamiento del usuario y del prestador del servicio.

### **Antecedentes**

Una parte importante del consumo eléctrico en un hogar es ocasionado por el uso inadecuado de los electrodomésticos. Los sistemas de administración de la energía en una casa se enfocan en la eficiencia energética y el confort del usuario. Pero no toman en cuenta la tarifa horaria y no hay coordinación entre los electrodomésticos de la vivienda. Tampoco existe una coordinación entre las viviendas de una comunidad para administrar el consumo eléctrico de ellas.

### **Administración de la energía por el usuario**

Consiste en cumplir una lista de tareas y aplicar un procedimiento para reducir el costo total del consumo, lo cual influye también en la disminución del pico de la demanda. Las tareas se ejecutan en un cierto orden considerando el costo variable de la tarifa horaria. La tarea de administrar a la energía es compleja porque el sistema a controlar es no lineal, y el medio ambiente y la demanda del usuario cambian con la hora del día y la temporada.

## **Predicción de precios de la electricidad**

Es una tarea fundamental para el momento de tomar decisiones. Hacen uso de ella los que participan en el mercado; el usuario, el prestador del servicio, y el inversionista. Una predicción exacta y confiable del precio es útil en tareas de control a corto plazo, en planeación a largo plazo, en formulación de tarifas y en decisiones de inversión. El carácter no estacionario de los precios de la electricidad hace que los errores en la predicción sean comunes y algunas veces sean errores significativos.

## **Estado del arte**

En la literatura [1, 2, 3, 4, 5, 6] formulan a la administración de la energía como un problema de programación, donde la energía es un recurso compartido, los periodos de consumo de energía son consideradas como tareas y los electrodomésticos son programados para que su consumo sea menor al máximo de energía disponible en la red. Para predecir la demanda se usan los patrones de uso pasados, la energía producida por el usuario a través de paneles solares, y los factores sociales y ambientales. La respuesta a la demanda y las tarifas por horario de uso son iniciativas de administración empleadas para balancear el consumo de energía en las redes inteligentes [5]. La programación del encendido de los electrodomésticos y la administración de la energía almacenada reduce la demanda de carga. Una carga menor reduce los costos de operación de la red y el prestador del servicio puede ofrecer un menor costo en la tarifa.

Wan *et al* [1] proponen un enfoque híbrido para cálculos de predicción. El método está compuesto por dos etapas. En la primera etapa se aplican máquinas de predicción extrema para estimar valores de predicción y calcular las incertidumbres provocadas por el modelo. En la segunda etapa se usa el método de máxima similitud para estimar el error originado por el ruido.

## **Máquina de aprendizaje extremo**

Es un algoritmo de entrenamiento de una red neuronal de propagación hacia adelante que consta de solo una capa oculta. Los pesos de entrada y los umbrales

ocultos son asignados de manera aleatoria y no son sintonizados durante el entrenamiento, lo cual provoca una degradación poco significativa en el comportamiento de la red. Solo los pesos de salida son calculados analíticamente usando una matriz de computación simple  $H$  [1].

Ducange *et al* [2] proponen un monitoreo no intrusivo que consiste en un algoritmo de disgregación usado para identificar a los electrodomésticos que contribuyen en un momento dado al consumo eléctrico. Los autores hacen la disgregación auxiliados de un medidor inteligente que ayuda a disminuir el número de mediciones necesarias. Los autores afirman que los métodos intrusivos para la medición del consumo ofrecen precisión pero su uso práctico está limitado por el costo de los sensores a instalar, especialmente cuando el número de electrodomésticos es alto.

Para describir el funcionamiento de cada electrodoméstico se usa una máquina de estados finitos con transiciones difusas. El algoritmo de separación usa las diferencias de los resultados de las mediciones de las potencias real y reactiva, para formular hipótesis de las posibles combinaciones de los electrodomésticos activos durante un evento de cambio de estado en el consumo eléctrico [2].

Ozturk *et al* [3] describen una solución integral para predecir y reestructurar a la demanda eléctrica del usuario. La solución integral incluye un modelo ANFIS, alojado en el controlador maestro en el hogar del usuario, usado para predecir el momento de encendido de los electrodomésticos y su duración. Después de calcular la predicción la envían a la compañía prestadora del servicio a un registrador regional que da conectividad entre las viviendas y la aplicación de la compañía. El registrador suma y acumula todas las demandas informadas en tiempo real por las viviendas. La demanda total le sirve a la aplicación de la compañía para calcular la tarifa.

Las entradas a la aplicación de la compañía son; la predicción de la demanda de la comunidad, las predicciones de la demanda comercial e industrial, la predicción de la energía eléctrica producida a partir de energía solar en la vivienda del usuario, la energía disponible de la red y las condiciones del medio ambiente. Las

salidas de la aplicación de la compañía son; la respuesta a la demanda a sugerir a los usuarios, la tarifa horaria y los incentivos [3].

El usuario influye en el uso eficiente aceptando las sugerencias de la empresa enfocadas hacia un compromiso entre costo, nivel de confort y una respuesta acertada a la demanda. El enfoque de la compañía es predecir la demanda individual, la demanda de la comunidad y presentarle al usuario una programación de encendido de los electrodomésticos que mejore la respuesta del usuario a la demanda. La información de la compañía se presenta en un panel y el usuario acepta los consejos del sistema o selecciona operación inmediata. Las ventajas del sistema son; uso eficiente de la electricidad, que se traduce en menor costo del consumo, y educación del usuario con consejos de ahorro de energía e interacción de información diaria, semanal, y mensual de patrones de consumo de energía [3].

Kunwar *et al* [4] presentan un administrador de energía basado en predicción de carga. El consumo del día siguiente se predice para cada hora usando redes neuronales. El perfil de carga de la predicción y la función de costo se presentan juntos. También se presenta un perfil de encendido de electrodomésticos con un pico de carga menor y el usuario tiene la opción de programar el encendido de cargas guiándose por el perfil propuesto. El costo de la energía eléctrica depende del factor de carga,  $\text{Factor de carga} = (\text{Consumo Promedio} / \text{Consumo Pico})$ . Al aumentar el factor de carga, disminuye el costo del consumo. Cuando el factor de carga es cercano a uno, se asegura un uso óptimo de la energía existente en las redes de los sistemas de distribución.

Los autores usan una red neuronal de retro propagación para la predicción. Las variables de entrada son; carga media de la semana previa, carga del mismo día en la semana previa, carga del día previo, día de la semana, hora del día. La capa oculta está compuesta por veinte neuronas con función de activación sigmoideal logarítmica. La capa de salida es una neurona con una función de activación lineal. La salida es la predicción de carga para el día siguiente a la hora indicada [4].

Qela *et al* [5] usan un enfoque de lógica difusa para controlar picos de carga en una red inteligente. Los autores usan el enfoque de lógica difusa por su utilidad para actuar en escenarios de cambio e incertidumbres. La incertidumbre de la demanda instantánea diaria de energía está influenciada por; el cambio en los patrones de comportamiento del usuario, el cambio en las necesidades de los usuarios, las limitaciones de las fuentes de generación de energía, y los cambios del clima.

Desde la perspectiva del calentamiento global y el agotamiento de los recursos energéticos, las fuentes de energías renovables están ganando atención. También los apartamentos eléctricos y las casas inteligentes de corriente directa están aumentando. Una característica de estos sistemas son las fluctuaciones de la potencia de las energías renovables. Dichas fluctuaciones ocasionan que el balanceo entre la energía disponible y la demanda del usuario sea una tarea compleja.

Tanaka *et al* [6] presentan una metodología que minimiza las fluctuaciones de potencia en una red inteligente con fuentes de energías renovables. Los autores usan cargas controlables como medida de solución para lograr un balance entre el suministro de energía y la demanda. Como consecuencia, desarrollan un método para la operación óptima de un grupo de seis casas inteligentes, con cargas residenciales controlables, conectadas al sistema de potencia y al sistema de control a través de una línea de transmisión e infraestructura de comunicaciones. El sistema de control envía señales para controlar a los electrodomésticos de las casas inteligentes como respuesta a las condiciones del sistema [6].

Lo que aquí se propone es un sistema que monitorea el consumo de energía eléctrica de los electrodomésticos de una casa residencial. El sistema es una herramienta útil que muestra el consumo para que el usuario a través de planeación haga un uso eficiente y logre un ahorro en el costo del servicio. El sistema ayuda al usuario a planear cambios en el horario de uso para mejorar su perfil de demanda. Los cambios se programan para evitar el consumo excesivo en horas pico y mejorar el factor de carga.

## **2. Desarrollo**

La función del sistema de monitoreo consiste en la medición continua de los parámetros de interés y su almacenamiento, en una base de datos, para presentarlos de manera gráfica las veces que lo solicite el usuario. El flujo de los resultados de medición hacia la base de datos, con fines de almacenamiento, es transparente al usuario. El registro de las mediciones tiene varios objetivos; monitorear de manera visual, predecir el uso de la energía eléctrica, graficar la demanda diaria, y calcular el consumo.

Para monitorear el consumo de manera visual, el controlador de registro de medición continuamente registra las mediciones de las corrientes que circulan en la línea principal y en los contactos especiales. También registra las mediciones del voltaje de la línea principal. Las mediciones se hacen en tiempo real, con una periodicidad que se selecciona durante la programación, por ejemplo; una medición por segundo. Para ver a los datos almacenados se usa el administrador de bases de datos phpMyAdmin. Para extraer datos y presentarlos de manera gráfica se usa HighCharts.

Para predecir el uso de la energía eléctrica, el controlador de registro de medición analiza a cada dato de la corriente principal, después de almacenarlo. Cuando la variación del dato es pequeña, se concluye que el cambio es por el ruido de la red y se ignora dicho cambio. Cuando la variación del dato en la línea principal es significativa, se toman lecturas consecutivas para corroborar que el cambio sea por efecto de una conexión o desconexión. En caso positivo, se analizan las mediciones de los contactos para deducir cuál de los electrodomésticos fue activado.

También, se registran los datos referentes a patrones de uso por la interacción del usuario con el sistema. Los patrones de uso del usuario son; momento de encendido, duración de encendido, hora del día, y día de la semana. Lo que hace la diferencia entre un electrodoméstico y otro es la magnitud del cambio. La magnitud se usa para buscar una magnitud igual, en los registros de cambios anteriores, e identificar al electrodoméstico que fue activado. Si es primera vez que se activa, el electrodoméstico recibe una clave que lo identifica.



Numerar a los contactos ayuda también a identificar al electrodoméstico, es práctica común conectar un aparato a un mismo contacto repetidas veces. Un incremento del consumo indica el encendido de un aparato, un decremento indica su apagado. Los momentos de encendido y los periodos de duración se almacenan en una base de datos especial. Estos datos sirven para pronosticar el momento de encendido de cada electrodoméstico y su duración. También sirven para graficar el perfil de consumo del usuario y para calcular el consumo eléctrico.

### **Algoritmo de control**

Un contacto se caracteriza por los electrodomésticos que se conectan a él. Un contacto especial es aquel al que se conectan las cargas susceptibles de control con fines de respuesta a la demanda. El algoritmo de control identifica, al electrodoméstico activado, a través del análisis de las mediciones registradas, correspondientes a la corriente de la línea principal y las corrientes en los contactos especiales.

Cuando varios aparatos se conectan a un mismo contacto especial, el algoritmo de control asigna una clave a cada uno de ellos. La demanda del contacto es corroborada en el historial de consumo, para identificar a cada aparato. Significa que a través de la comparación de las mediciones de la intensidad de la corriente, y su duración, se identifica las veces que ha sido activado un electrodoméstico.

Para cada electrodoméstico se estiman intervalos de confianza; uno para la hora de encendido, otro para la duración de encendido, y un último para el intervalo entre cada ciclo de operación. Cada nueva medición de un aparato activado y desactivado se usa para calcular y actualizar al intervalo de confianza. De esta manera se considera el carácter dinámico del comportamiento del usuario.

Las cargas se clasifican en; no significativas, susceptibles, y no susceptibles. Una carga no susceptible es aquella que por sus características de uso es ilógico moverla de su horario habitual. Cargas no significativas son las que se pueden ignorar. En el presente trabajo los equipos electrónicos que contribuyen con una corriente menor a tres cientos miliamperios son considerados como cargas no significativas y son ignoradas por el algoritmo de respuesta a la demanda. Las

cargas susceptibles son las que se pueden cambiar de horario de uso y se dice que son susceptibles de respuesta a la demanda.

## **Análisis**

La etapa de análisis consiste en un conjunto de bloques de programación para; hacer la predicción de la demanda a corto plazo, presentar el cálculo del consumo, y graficar un perfil alternativo como respuesta a la demanda.

## **Predicción de la demanda**

Cierto tipo de electrodomésticos, como la lavadora, son operados algunos días de la semana y se dice que siguen un patrón semanal. Las predicciones de la lavadora se hacen por semana y se requiere pronosticar los días en que será operada. Ciertos electrodomésticos, como la estufa eléctrica, son operados todos los días y se dice que siguen un patrón por día. Se requiere pronosticar las horas del día en que la estufa eléctrica será accionada.

Un grupo especial de electrodomésticos son los variables continuos que carecen de un número fijo de estados estables de trabajo y sus características de potencia son no repetitivas. Una parte de los equipos electrónicos cae en esta clasificación; PC, DVD, cargadores de baterías. En el presente artículo el grupo de electrodomésticos que interesa es el que trabaja en un número limitado de estados estables.

Se usan los momentos de encendido y apagado del electrodoméstico para registrar las variables de importancia; la hora exacta, el día, la magnitud del cambio, la duración de encendido y el intervalo de tiempo entre cada operación. Para cada electrodoméstico se establece un modelo de predicción basado en intervalos de confianza del noventa y nueve por ciento, para las variables mencionadas, en el rango de un día o de una semana.

El modelo consiste en identificar el tipo de patrón de comportamiento, semanal o diario. Para un patrón diario se consideran como variables de predicción las variables de interés; la hora de encendido, la duración de encendido y el intervalo

entre cada operación del electrodoméstico. Para un patrón semanal se consideran como variables de predicción todas las anteriores y además el día de encendido.

### Cálculo del consumo

El perfil del consumo se usa, junto con la tarifa horaria, para el cálculo del consumo. En los cálculos participan la hora de encendido, la duración de encendido y la tarifa horaria. Se suman los gastos para obtener el consumo del día y luego los días para obtener el consumo del mes. También se suman los consumos por electrodoméstico y se registra el consumo del electrodoméstico por mes. Se muestran las estadísticas por separado; Consumo total, y consumo para cada electrodoméstico; por día, semana, o mes.

## 3. Resultados

### Sistema de monitoreo

La medición de los parámetros de los electrodomésticos es información útil para el análisis del comportamiento de las cargas. Para ello se implementó un sistema con la finalidad de registrar los parámetros eléctricos, tales como la corriente y el voltaje. En la figura 1 aparecen representadas de manera simbólica las tareas que desempeña el sistema. Los principales componentes usados en el sistema son: sensores no invasivos de corriente, sensores de voltaje, dispositivos de comunicación Ethernet, placas de desarrollo Arduino y Raspberry Pi.

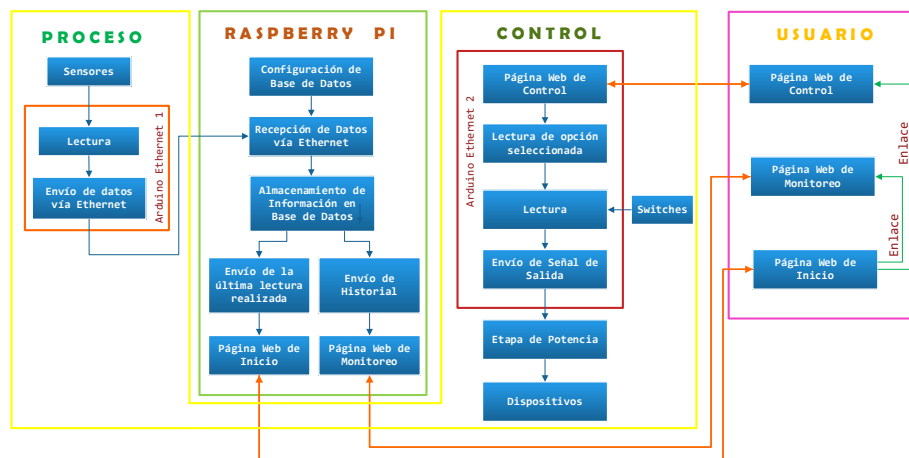


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema.

El sistema se compone de varias etapas; una etapa para medir las corrientes y el voltaje, un servidor de página web de monitoreo, un servidor de página web para tareas de control, la etapa de control, y dispositivos móviles como una Laptop o un teléfono celular. La comunicación es vía internet, por eso se puede acceder al sistema desde los dispositivos móviles. Para transmitir instrucciones de control se accede, a través de un enlace, desde la página web de la Raspberry a la página web correspondiente, alojada en cada placa Arduino Ethernet de la etapa de control. La función de la placa de control es encender o apagar cargas específicas. La señal eléctrica de los sensores se pasa por una etapa de acondicionamiento y se entrega a una placa de desarrollo Arduino Ethernet. La placa de desarrollo Arduino está comunicada a través del puerto Ethernet con un modem. La función del modem es transmitir la información de manera inalámbrica a otro modem conectado a una placa Raspberry Pi, la cual recibe y almacena la información en una base de datos.

En la placa de desarrollo Raspberry Pi se implementó una página web dinámica, ver figuras 2 y 3. Esta página permite acceder a la base de datos, ver figura 4, y presentar los valores de las mediciones recientes. También, La página web dinámica incluye un enlace para administrar a la base de datos y ver un historial del comportamiento del consumo.

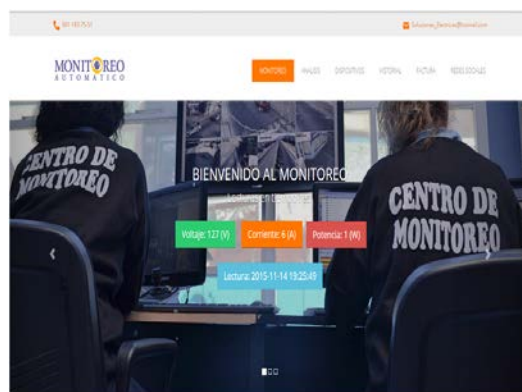


Figura 2 Página web de monitoreo.

Para el desarrollo del sistema se usaron aplicaciones de software que se ejecutan en Raspbian, una distribución de GNU/Linux. Entre los programas usados destaca

el servidor web apache, el cual permite visualizar la información almacenada en el servidor web alojado en una Raspberry. También destacan los lenguajes PHP y HTML que permitieron implementar páginas web dinámicas e interactivas. Además destaca MySQL que se empleó para crear las bases datos, acompañado de phpMyAdmin que se usó para gestionar y administrar las bases de datos.

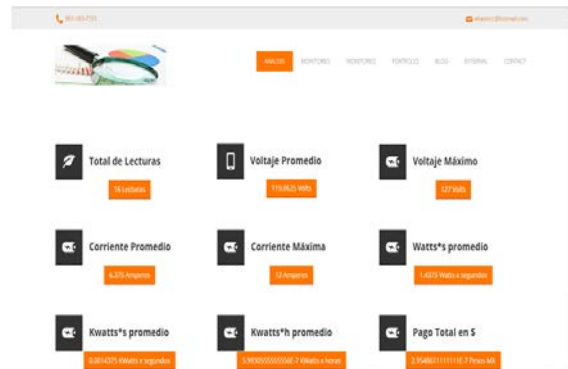


Figura 3 Página web de monitoreo.

ID	voltaje	corriente	potencia	tiempo
1	0	0	0	2015-11-08 00:19:58
2	127	12	2	2015-11-14 18:22:31
3	127	12	2	2015-11-14 18:23:10
4	127	6	4	2015-11-14 18:49:55
5	127	6	4	2015-11-14 18:50:00
6	127	6	1	2015-11-14 18:50:33
7	127	6	1	2015-11-14 18:50:36
8	127	6	1	2015-11-14 19:25:28
9	127	6	1	2015-11-14 19:25:33
10	127	6	1	2015-11-14 19:25:35
11	127	6	1	2015-11-14 19:25:37
12	127	6	1	2015-11-14 19:25:39
13	127	6	1	2015-11-14 19:25:42
14	127	6	1	2015-11-14 19:25:44
15	127	6	1	2015-11-14 19:25:47
16	127	6	1	2015-11-14 19:25:49

Figura 4 Datos almacenados en el servidor.

La manera de acceder a la información es a través del servidor web donde apache permite navegar en las bases de datos. Se accede al servidor a través de internet mediante la dirección IP asignada a la Raspberry. Esta opción permite acceder a las páginas web desarrolladas para la visualización de los datos con una interfaz que permite la presentación de la información. En la interfaz se observa el consumo en tiempo real, ver figura 2.

## Control de cargas

Con la información almacenada en las bases de datos se evaluaron los grados de consumo de los electrodomésticos clasificándolos en consumos; no significativos, susceptibles y no susceptibles. Los electrodomésticos se agruparon en aquellos que su nivel de consumo es mínimo y se desprecia la identificación de ese electrodoméstico, por la debilidad de las afectaciones del mismo en el consumo total.

Aquellos aparatos que sus consumos son adecuados para ser administrados de mejor manera fueron designados susceptibles. Es decir aquellos aparatos que su uso tiene la posibilidad de ser aplazado y que el aplazamiento es bien aceptado por los usuarios del hogar, por ejemplo; el uso de electrodomésticos tales como la lavadora, o la plancha. Los no susceptibles son aquellos que su consumo es significativo, pero que su uso no puede ser aplazado, porque el aplazamiento difícilmente es bien aceptado por los usuarios del hogar.

En la figura 5 se presenta el monitoreo del voltaje y la corriente de una bomba de agua. La gráfica está hecha con software libre *HighCharts*. La línea azul representa el voltaje registrado y la línea verde es la corriente registrada. En la gráfica se pueden observar los momentos de encendido del motor que aparecen en forma de rectángulo.



Figura 5 Gráfica elaborada con HighCharts.

Con el código presentado en la tabla 1, cargado en la memoria de un Arduino Ethernet, se programó el envío de los resultados de las mediciones a una base de datos, a través del uso del método GET. La información es transmitida por la

conexión Ethernet desde la placa de Arduino hasta la base de datos alojada en el servidor instalado en la placa Raspberry. Cada electrodoméstico monitoreado cuenta con un Arduino Ethernet que captura las mediciones del consumo. El tiempo transcurrido entre una medición y otra depende del retardo programado.

Tabla 1 Código para capturar y enviar datos de medición.

```
#include <Ethernet.h>
#include <SPI.h>
#include "EmonLib.h"
EnergyMonitor emon1;
byte mac[]={0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFF, 0xEF}; //Dirección MAC
byte ip[]={192,168,0,106}; //IP Arduino Ethernet
byte server[]={192,168,0,100}; //IP servidor(Raspberry pi)
EthernetClient client;

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  Ethernet.begin(mac,ip);
  emon1.voltage(2, 234.26, 1.7); // Voltage: pin de entrada, calibración, desfase
  emon1.current(1, 111.1); // Corriente: pin de entrada, calibración.

void loop(void) {
  //calculo de corriente, voltaje, potencia aparente, potencia activa y factor de potencia
  emon1.calcVI(20,2000); // Calcular: numero de semi ciclos, tiempo fuera
  float realPower = emon1.realPower; //extraer potencia real
  float apparentPower = emon1.apparentPower; //extraer potencia aparente
  float powerFactor = emon1.powerFactor; //extraer factor de potencia
  float supplyVoltage = emon1.Vrms; //extraer voltaje efectivo Vrms
  float Irms = emon1.Irms; //extraer Irms
  serial.println("connecting...");

  if (client.connect(server,80)>0) {
    //Enviar los valores de los sensores al archivo Tabla.php

    client.print("GET /wwe/plantilla/monitoreo.php?voltaje=");
    client.print(supplyVoltage);
    client.print("&corriente="); client.print(Irms);
    client.print("&potencia real="); client.print(realPower);
    client.print("&potencia aparente="); client.print(apparentPower);
    client.print("& FactorDePotencia="); client.print(powerFactor);
    client.println(" HTTP/1.0"); client.println("User-Agent: Arduino 1.0");
    client.println(); Serial.println("Conectado"); }
  else { Serial.print("fallo de conexión... "); }

  if (!client.connected()) { Serial.println("desconectado!"); }
  client.stop(); //Detener comunicación
  client.flush(); delay(5000); }
```

Con el código presentado en la tabla 2, cargado en la memoria de una placa de desarrollo Arduino Ethernet, dedicada para tareas de control, se programó el envío

de comandos para encendido apagado de electrodomésticos, a través del uso del método POST. La información es transmitida por internet desde un dispositivo móvil hasta el Arduino Ethernet, donde está alojada la página web de control. El programa cargado en el Arduino Ethernet desempeña la función de un servidor de página web cuya finalidad es enviar comandos de control para actuar a distancia desde cualquier dispositivo conectado a internet.

Tabla 2 Código para encender y apagar cargas a través de internet.

```

<!DOCTYPE html>
<html lang="es"> <head> <meta charset="UTF-8" />
<meta http-equiv="X-UA-Compatible" content="IE=edge,chrome=1">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Boton</title>
<script src="js/jquery-1.9.1.js"></script>
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/estilo.css" />
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="css/bootstrap.min.css" /></head>
<body><br> <div class="container">
  <header><br><h4>CONTROL CUARTO DORMITORIO</h4><CENTER>
    <h4> APAGADOR VENTILADOR</h4> </CENTER><hr></header>
  <section><br><br><input type="checkbox" id="switch" name="switch">
    <label for="switch" class="switch"></label>
    <div align="center" id="bombillo"></div><br></section>
    <div align="center" id="imagen_bombillo"></div>

  <header><br><CENTER>
    <h4> APAGADOR VENTILADOR</h4> </CENTER><hr></header>
  <section><br><br><input type="checkbox" id="switch2" name="switch2">
    <label for="switch2" class="switch"></label>
    <div align="center" id="bombillo2"></div><br></section>
    <div align="center" id="imagen_bombillo2"></div></div>

  <!--Imagen de foco A/E, y etiqueta para switch-->
<script>$("#switch").change(function(){var chequeado=$("#switch").attr("checked");
  if(chequeado) {$("#switch").removeAttr("checked");
    console.log("estado 1");    var estado=1;
    $("#bombillo").text("Apagado");
    $("#bombillo").removeClass('alert alert-info').addClass( "alert alert-danger" );
    $("#imagen_bombillo").html('');
    $.ajax({data:{valor_estado: estado},
      url:'procesa.php',      type:'POST',
      success: function(response){//alert("Salida: "+response );}    }); }
    else {$("#switch").attr("checked","checked");
      console.log("estado 2");    var estado=2;
      $("#bombillo").text("Encendido");
      $("#bombillo").removeClass('alert alert-danger').addClass( "alert alert-info" );
      $("#imagen_bombillo").html('');
      $.ajax({data:{valor_estado: estado},
        url:'procesa.php',      type:'POST',
        success: function(response){//alert("Salida: "+response );}    }); }
    }); </script> </body></html>
  
```



## **4. Discusión**

En términos de los electrodomésticos no conviene que todos queden automatizados con respuesta a la demanda, algunos deben quedar semi automáticos y otros su operación debe ser manual. La intención es disponer de un sistema que registre y prediga información sobre costos de consumo de energía eléctrica considerando la tarifa horaria y ello permita hacer ajustes del consumo de la energía. En este artículo las consideraciones de la tarifa horaria y los resultados en el desarrollo del método de predicción se dejaron para trabajos futuros.

## **5. Conclusiones**

El manejo de datos producto del registro sistemático de la corriente demandada por los electrodomésticos permite; predecir el consumo de energía eléctrica, detectar a los aparatos de mayor consumo, identificar a los horarios de mayor actividad de los electrodomésticos, y observar sectores del consumo factibles de mejora en su eficiencia. También, la introducción de la clasificación de electrodomésticos permite definir a los aparatos susceptibles de una mejor gestión y administración de uso.

El análisis de los datos almacenados en la base de datos permite identificar patrones de uso de los electrodomésticos, tales como; el horario típico de encendido, el horario habitual de apagado de este, el grado de demanda de energía, y los días cotidianos de uso. Con esta información es factible aplicar algoritmos para un control que evite afectar el confort proponiendo al usuario la decisión de usar a los aparatos en momentos idóneos, con el propósito de mantener una mejor demanda de energía eléctrica. Es decir, un consumo más uniforme, un consumo con máximos de menor magnitud.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] C. Wan, Z. Xu, Y. Wang, Z. Yang Dong, K. Po Wong, "A Hybrid Approach for Probability Forecasting of Electricity Price". IEEE Trans. On Smart Grid. Vol. 5. January 2014. Pp. 463-470.

- [2] P. Ducange, F. Marcelloni, "A Novel Approach Based on Finite-State Machines with Fuzzy Transitions for Nonintrusive Home Appliance Monitoring". *IEEE Trans. on Industrial Informatics*. Vol. 10. May 2014. Pp. 1185- 1197.
- [3] Y. Ozturk, D. Senthilkumar, S. Kumar, G. Lee, "An Intelligent Home Energy Management System to Improve Demand Response". *IEEE Trans. On Smart Grid*. Vol. 4. June 2013. Pp. 694-701.
- [4] N. Kunwar, K. Yash, R. Kumar, "Area-Load Based Pricing in DSM Through ANN and Heuristic Scheduling". *IEEE Trans. On Smart Grid*. Vol. 4. September 2013. Pp. 1275-1281.
- [5] B. Qela, H.T. Mouftah, "Peak Load Curtailment in a Smart Grid Via Fuzzy System Approach". *IEEE Trans. On Smart Grids*. Vol. 5. March 2014. Pp. 761-768.
- [6] K. Tanaka, K. Uchida, K. Ogimi, T. Goya, A.Yona, T. Senjyu, T. Funabashi, C-H. Kim, "Optimal Operation by Controllable Loads Based on Smart Grid Topology Considering Insolation Forecasted Error". *IEEE Trans. On Smart Grid*. Vol. 2. September 2011. Pp. 438-444.

## **7. Autores**

Dr. Rubén Herrera Galicia obtuvo el título de Doctor en Ciencias Técnicas con especialidad en electrónica por la Technical University of Warsaw, Polonia.

Eliasin Camacho Cruz. Alumno del noveno semestre de la carrera de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Fernando Alexis Hernández López. Alumno del noveno semestre de la carrera de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Adriana del Carmen Pérez Zamora. Alumna del quinto semestre de la carrera de Ing. Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Ernesto Gómez Ruiz. Alumno del noveno semestre de la carrera de Ing. Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

# PROTOTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO CON SEGUIMIENTO SOLAR DE BAJO COSTO

***José Sebastián Gutiérrez Calderón***

Universidad Panamericana campus Aguascalientes

*jsgutierrez@up.edu.mx*

***Pedro Manuel Rodrigo Cruz***

Universidad Panamericana campus Aguascalientes

*prodrigo@up.edu.mx*

## Resumen

Los sistemas fotovoltaicos transforman la luz solar en electricidad. Estos sistemas suelen utilizar una estructura fija con orientación óptima para el montaje de los módulos fotovoltaicos. Con este concepto, si se desea incrementar la producción de energía, es necesario aumentar el número de módulos fotovoltaicos, lo cual repercute en el costo del sistema. La presente investigación explora la posibilidad de incrementar la producción de energía sin añadir más módulos fotovoltaicos, mediante la utilización de un sistema de seguimiento solar móvil de bajo costo acoplado al sistema fotovoltaico. Para reducir los costos se tomaron dos decisiones en el diseño: primero, implementar un seguidor con un único eje norte-sur con inclinación óptima (en este caso, 21° para Aguascalientes), lo cual simplifica el diseño mecánico respecto al seguimiento a dos ejes; segundo, dividir el movimiento diario del actuador en 10 pasos, en lugar de realizar un movimiento continuo, lo cual simplifica el control electrónico. El prototipo cuenta con un sistema de monitorización para medir las ganancias en captación de irradiación solar respecto a un sistema de estructura fija. Se presentan como resultados las medidas de 4 días de operación completa, así como la tabla de costos de implementación del prototipo.

**Palabra(s) Clave(s):** Arduino, seguidor solar, sensor de corriente, sistema fotovoltaico autónomo.

## **1. Introducción**

Los sistemas fotovoltaicos autónomos transforman directamente la luz solar en electricidad operando de manera aislada de la red eléctrica. [1] Estos sistemas fotovoltaicos pueden tener estructura fija o estructura con seguimiento solar. Estos últimos permiten rastrear el sol desde el amanecer hasta el atardecer obteniendo una mayor captación de energía solar. [2]

En México la generación de energía por medio de sistemas fotovoltaicos permite el aprovechamiento favorable de la irradiación solar por su localización y clima. De ahí la importancia de aprovechar al máximo la irradiación solar con mecanismos. [3] Actualmente el costo de la mayoría de los sistemas fotovoltaicos que cuentan con un sistema de seguimiento por kWp de potencia instalada es mayor que el costo de los sistemas fijos. Aunque algunos estudios actuales muestran un aumento entre el 30-50% de captación de irradiación utilizando sistemas de seguimiento en comparación con sistemas fotovoltaicos fijos. [4]

El trabajo presentado en este artículo se enfoca en implementar un sistema fotovoltaico autónomo con seguimiento solar de bajo costo. Actualmente los sistemas de seguimiento solar que emplean sistemas de monitoreo y control están basados en controladores lógicos programable (PLC), estos se utilizan para controlar y vigilar el movimiento mecánico del módulo fotovoltaico y para obtener y almacenar datos relacionados con la radiación solar. [5] [6]

Para lograrlo, en el prototipo con seguidor, se busca que el área del módulo fotovoltaico este en posición más perpendicular a la irradiación lumínica de la fuente de luz, lo cual se logra mediante un algoritmo programado en una tarjeta embebida con microcontrolador.

## **2. Desarrollo**

En el prototipo se utilizaron simultáneamente una estructura fija y una estructura móvil para poder comparar las ganancias en captación de irradiación solar del sistema móvil con respecto al fijo.

En primer lugar se determinó la posición de los módulos fotovoltaicos, tanto del módulo fijo como el módulo con seguidor. El módulo fijo estaría con orientación

hacia el sur a 21 grados de inclinación, un posicionamiento óptimo para maximizar la captura de energía anual en Aguascalientes mediante sistema fijo. El módulo con seguidor estaría mirando hacia el sur de igual forma, pero con movimiento alrededor del eje norte-sur inclinado 21 grados. El giro se ajusta para que la normal a la superficie sea en todo momento lo más paralela posible a los rayos solares y la velocidad de giro es variable a lo largo del día.

Una vez determinada la orientación, se estableció la estructura del sistema. La estructura se diseñó buscando utilizar el menor material posible para abaratar el costo y se cuidó que cumpliera con la inclinación adecuada para el estado de Aguascalientes, es decir, 21 grados, para que los módulos recibieran los rayos del sol de forma lo más perpendicular posible durante un mayor lapso de tiempo y de esta forma lograr un mejor desempeño. Por los motivos mencionados anteriormente, la estructura se realizó con perfil redondo de acero, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Estructura del seguidor solar.

El seguimiento implementado podría considerarse de tipo azimutal. El azimut es el ángulo que forma un cuerpo celeste y el Norte, medido en sentido de rotación de las agujas de un reloj alrededor del horizonte del observador. Éste determina la dirección de un cuerpo celeste. Por ejemplo, un cuerpo celeste que se halla al Norte tiene un azimut de  $0^{\circ}$ , uno al Este  $90^{\circ}$ , uno al Sur  $180^{\circ}$  y al Oeste  $270^{\circ}$ . En el sistema implementado, al amanecer los módulos están en posición vertical orientados al Este, para recibir de la forma más perpendicular posible a los rayos solares; en el mediodía solar, los módulos están orientados al Sur con inclinación

de  $21^{\circ}$ , es decir, en este instante las posiciones del sistema fijo y del móvil son equivalentes; en el ocaso, los módulos están en posición vertical orientados al Oeste. El movimiento de giro está dividido en 10 pasos buscando minimizar el ángulo entre la normal a los módulos y los rayos solares en cada instante. La estructura del prototipo fue diseñada para soportar 4 módulos fotovoltaicos monocristalinos de 89W cada uno. En este prototipo únicamente se colocaron 3 módulos en la estructura. En la figura 2 se muestra la estructura con los módulos instalados. La parte baja de la estructura (1) se encuentra fija conectado a un sensor de corriente ACS712, los módulos superiores (2) y (3), son los módulos con movimiento. El módulo (2) se encuentra conectado a otro sensor de corriente ACS712. [7] El módulo (3) se conectó a un controlador de carga, una batería, a la tarjeta Arduino® con el módulo MicroSD y a un puente H, encargado junto con el actuador eléctrico 6110TP de realizar el movimiento seguidor.



Figura 2 Estructura de los módulos fotovoltaicos.

La implementación de estos elementos mecánicos y sistemas de control al módulo con seguidor, permitirá realizar los giros del módulo a lo largo del día, y de esta manera estudiar el incremento en la captación de energía a comparación de los módulos fijos.

Al momento de implementar los módulos fotovoltaicos se estableció un sistema de control óptimo, el cual, permitió obtener en todo momento datos de cada uno de los módulos fotovoltaicos, permitiendo medirla corriente generada instantáneamente. Se implementó el control mediante una tarjeta embebida conocida como Arduino®, plataforma de hardware de código abierto, basada en

una sencilla placa con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno de desarrollo basado en el lenguaje de programación Processing. [8]

El algoritmo que se desarrolló en la tarjeta embebida que permitió calcular la hora solar y determinar el movimiento y control de sistema mecánico, se describe en la figura 3.

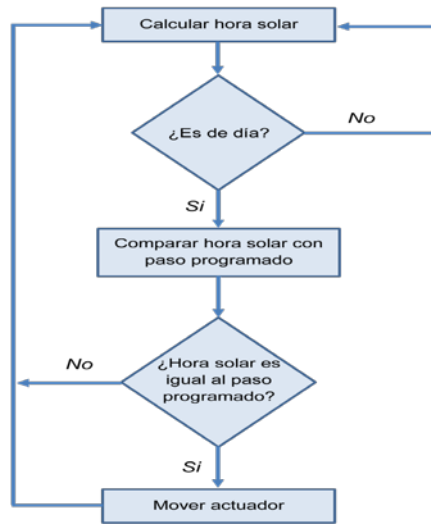


Figura 3 Diagrama de flujo del movimiento del actuador.

En dicho control del módulo fotovoltaico se añadieron a la tarjeta conectores compatibles con Arduino® para la creación de la base de datos manejable por el usuario, así como sensores especiales para medir la corriente (i) de cada módulo. Los datos obtenidos de los sensores y almacenados en la base de datos, permitieron crear históricos de las distintas variaciones a lo largo del tiempo de la corriente generada por el módulo fijo y por el módulo con seguidor.

Una vez conectados los sensores ACS712 en cada uno de los módulos fotovoltaicos, estos son conectados a la tarjeta mediante un puerto analógico para que el microcontrolador pueda interpretar el nivel de voltaje que estaba recibiendo y mediante operaciones programables en la tarjeta poder mostrar la corriente (i) de manera digital y lo más exacta posible. Una vez monitorizada la corriente (i) de cada uno de los dos módulos fotovoltaicos, para este prototipo se utilizó un módulo MicroSD de almacenamiento de datos, programado en la tarjeta mediante

el IDE de Arduino® permitiendo almacenar los datos y tener el control de la hora en la que se realizaron las mediciones. Estas mediciones se guardan en una tarjeta de memoria externa cuyos valores son almacenados en un archivo Excel. En la figura 4 se muestra el diagrama de conexión del sensor ACS712, módulo MicroSD y el módulo RTC con la tarjeta utilizada.

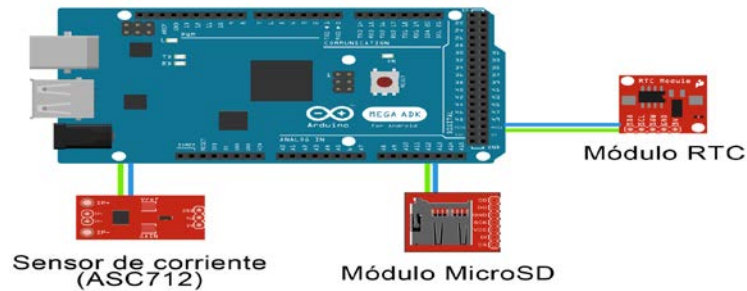


Figura 4 Diagrama de conexión del sensor ACS712, módulo MicroSD y RTC.

Con la tarjeta Arduino® al contar con comunicación I2C, permitió utilizar el módulo Tiny RTC fácilmente. Este módulo se compone entre otros elementos de un reloj DS1307, una memoria EEPROM 24C32AN y un soporte para pila de litio CR2032. [9] El módulo Tiny RTC nos proporcionó la fecha y hora exacta en tiempo real, transformada por el Arduino® para calcular la hora solar, ordenando al actuador eléctrico la inclinación del módulo fotovoltaico.

En la tabla 1, se muestra la posición en pulgadas del movimiento que realizó el actuador de acuerdo a la hora solar programada, comenzando a las 8:30 de la mañana terminando las 8:30 de la noche.

Tabla 1 Posición en pulgadas del movimiento del actuador.

<b>Tiempo (hr:min)</b>	<b>8:30</b>	<b>9:30</b>	<b>10:30</b>	<b>11:30</b>	<b>12:30</b>	<b>13:30</b>	<b>14:30</b>
<b>Posición (in)</b>	0	1	2	3	4	4	5
<b>Tiempo (hr:min)</b>	<b>15:30</b>	<b>16:30</b>	<b>17:30</b>	<b>18:30</b>	<b>19:30</b>	<b>20:30</b>	
<b>Posición (in)</b>	6	7	8	9	10	4	

Para realizar el movimiento de la posición del módulo fotovoltaico, el puente H (L298) es el responsable de controlar el actuador eléctrico para subir o bajar el



módulo, según la indicación recibida por el Arduino®, regulando la inclinación del módulo. El actuador eléctrico cuenta con un sensor y una resistencia variable leída por la tarjeta de control, la cual, determina la altura a la que se encuentra en ese momento el actuador y cuánto debe moverse más adelante. En figura 5 se muestra el diagrama de conexión completo del prototipo.

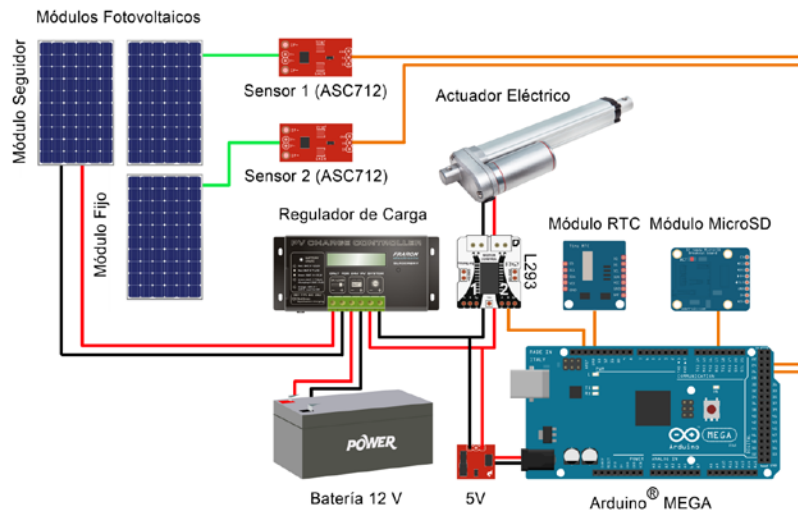


Figura 5 Diagrama de conexión del prototipo.

Para analizar las diferencias en captación de energía diaria del sistema móvil con respecto al fijo se utilizó el siguiente procedimiento:

La energía diaria en  $\text{Wh/m}^2$  capturada por uno cualquiera de los dos sistemas puede expresarse con ecuación 1.

$$E_{\text{diaria}} = \sum_i G_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

Siendo  $G_i$  la irradiancia incidente en el plano de los módulos ( $\text{W/m}^2$ ) en cada instante de tiempo e  $\Delta t$  el intervalo de tiempo en el que se registran las medidas a lo largo del día. La irradiancia incidente en el plano de los módulos es aproximadamente proporcional a la corriente de cortocircuito [10] medida por el sensor de corriente, por lo que se tiene ecuación 2.

$$E_{\text{diaria}} = \sum_i K \cdot I_{SC,i} \cdot \Delta t \quad (2)$$

Siendo K la constante de proporcionalidad entre la corriente y la irradiancia (característica del módulo fotovoltaico testado) e  $I_{SC,i}$  la corriente de cortocircuito medida por el sensor de corriente en cada instante.

El porcentaje de ganancia de energía diaria del sistema móvil con respecto al sistema fijo podrá expresarse entonces con ecuación 3.

$$Ganancia(\%) = \frac{E_{diaria}^{móvil} - E_{diaria}^{fijo}}{E_{diaria}^{fijo}} \times 100 = \frac{\sum_i K \cdot I_{SC,i}^{móvil} \cdot \Delta t - \sum_i K \cdot I_{SC,i}^{fijo} \cdot \Delta t}{\sum_i K \cdot I_{SC,i}^{fijo} \cdot \Delta t} \times 100 \quad (3)$$

Expresión que puede simplificarse en ecuación 4.

$$Ganancia(\%) = \frac{\sum_i (I_{SC,i}^{móvil} - I_{SC,i}^{fijo})}{\sum_i I_{SC,i}^{fijo}} \times 100 \quad (4)$$

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos del prototipo se lograron de manera satisfactoria, debido a que todos los dispositivos mecánicos para mover los módulos fotovoltaicos funcionaron correctamente así como el sistema de monitoreo donde se pudo medir la corriente de ambos módulos solares.

El prototipo fue utilizado por 4 días completos, en estos días se hizo la comparación del módulo fijo y del módulo seguidor, analizando la corriente (i) a lo largo del día (con luz solar real). Las figuras 6, 7, 8 y 9, muestra las gráficas de las corrientes tomadas desde el día 7 de julio al 10 de julio del 2015. La línea roja en las gráficas correspondiente al módulo fotovoltaico con seguidor y línea verde correspondiente al módulo fijo.

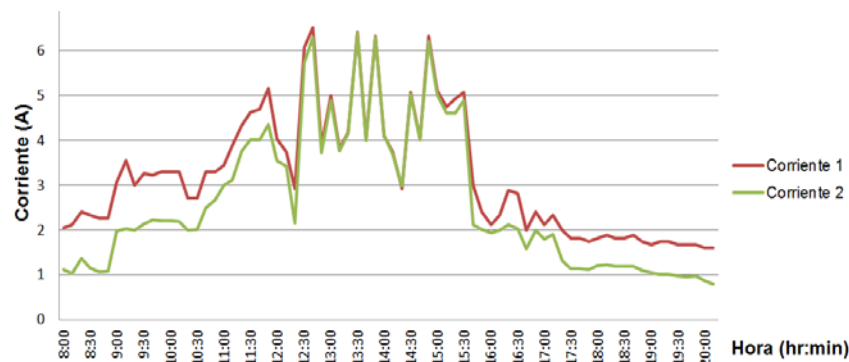


Figura 6 Gráfica de corrientes 7 de julio 2015.

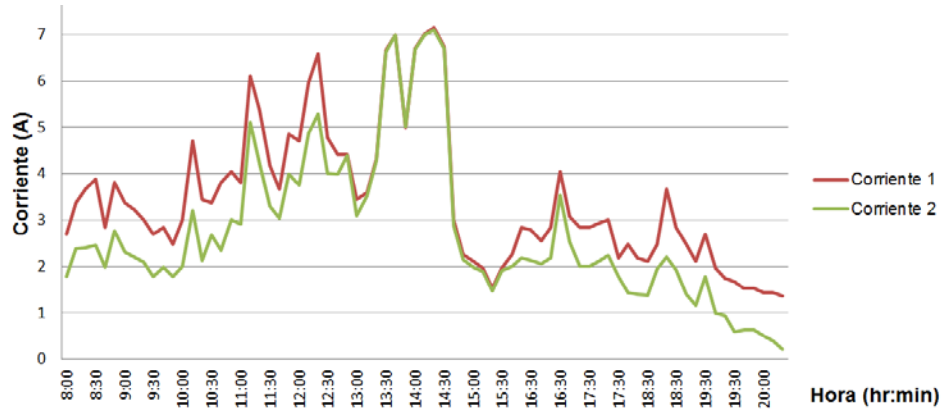


Figura 7 Gráfica de corrientes 8 de julio 2015.

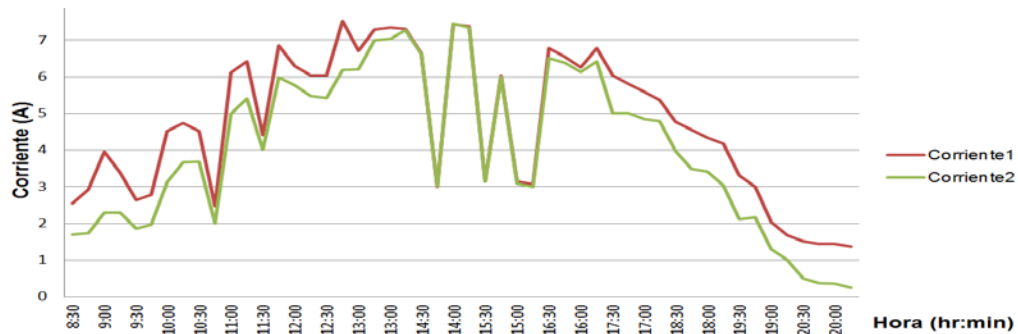


Figura 8 Gráfica de corrientes 9 de julio 2015.

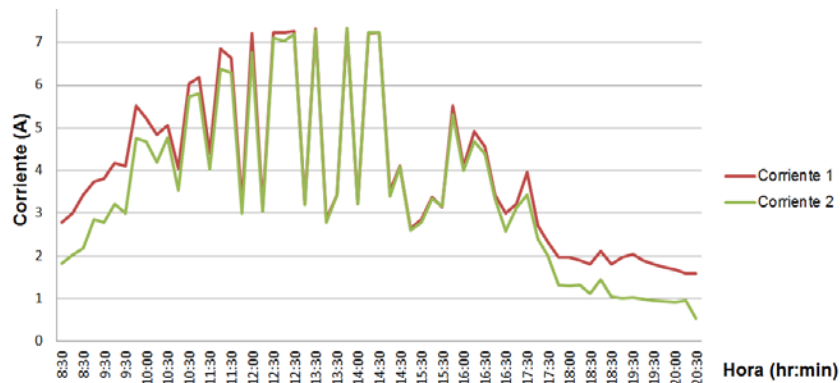


Figura 9 Gráfica de corrientes 10 de julio 2015.

En las figuras podemos observar la corriente del módulo fotovoltaico fijo y el módulo con seguidor, en donde en torno al mediodía solar, la corriente es muy parecida para los dos módulos debido a que su posición en este intervalo es prácticamente equivalente. Al comienzo y al final del día, la diferencia de corriente es considerable.

Mediante la ecuación 4 se han podido calcular las ganancias porcentuales de energía capturada por el sistema móvil respecto al fijo para los 4 días monitorizados. Dichas ganancias se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Sistema móvil respecto al sistema fijo para los 4 días monitorizados.

Fecha	Ganancia de captura de energía (%)
7 Jul 2015	22.2
8 Jul 2015	26.1
9 Jul 2015	16.4
10 Jul 2015	12.7

Como puede verse, las ganancias en energía capturada oscilaron entre 12.7% y 26.1% para los 4 días analizados. La ganancia de energía es variable en función de las condiciones de radiación registradas cada día. Como las ganancias instantáneas son mayores en las primeras y últimas horas del día, cuanto mayor sea el aporte de energía registrado en estos intervalos de tiempo respecto a la energía total diaria, mayores serán las ganancias obtenidas por el sistema de seguimiento.

La tabla 3 presenta los costos totales asociados a la adquisición de los equipos principales del prototipo actual.

Tabla 3 Costos de adquisición de los equipos principales del prototipo actual.

Material	Costo Unitario	Costo (MXN)
Panel Solar (3)	\$2,000	\$6,000
Controlador	\$500	\$500
Batería 12 V	\$300	\$300
Actuador	\$1,860	\$1,860
Arduino	\$350	\$350
Reloj	\$60	\$60
Módulo MicroSD	\$150	\$150
Sensor ACS712 (2)	\$100	\$200
Puente H	\$100	\$100
Perfil Redondo A (3x6)	\$100	\$300
Soldadura (kg)	\$30	\$30
<b>TOTAL</b>		<b>\$9,950</b>

Si únicamente se toma en cuenta el sistema de control y el sistema de automatización, así como la estructura, el costo asciende a \$3,950 pesos mexicanos, siendo éste un valor razonable y competitivo.

## 4. Discusión

Se ha calculado una ganancia media de energía del 20% con el sistema de seguimiento. Supongamos un sistema fijo de 10 módulos fotovoltaicos, en el cual, si se quisiera obtener un 20% más de energía, tendríamos que añadir 2 módulos fotovoltaicos más, unos \$4,000 pesos. Resulta rentable incorporar elementos que suman los \$3,950 pesos y obtener la misma energía con menor costo. Como ventaja adicional, obtenemos más energía con la misma superficie, la cual es útil si la superficie es limitada.

## 5. Conclusiones

Se pudo demostrar en este trabajo de investigación que la construcción de una estructura para sistemas fotovoltaicos autónomos con seguimiento solar, aumenta el porcentaje de captación de energía solar entre 12.7% y 26.1% para 4 días monitorizados. En cuanto al costo, se ha obtenido para los principales elementos mecánicos y de control del seguidor un costo de \$3,950 pesos mexicanos, accesible teniendo en cuenta los beneficios mencionados de incremento en la captación de energía solar.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] F. Famoso, R. Lanzafame, S. Maenza, P. F. Scandura, "Performance Comparison between Low Concentration Photovoltaic and Fixed Angle PV Systems". *Energy Procedia*. vol. 81. Dec 2015. Pp. 516–525.
- [2] H. Bentaher, H. Kaich, N. Ayadi, M. Ben Hmouda, A. Maalej, U. Lemmer, "A simple tracking system to monitor solar PV panels". *Energy Convers. Manag.* vol. 78. Feb. 2014. Pp. 872–875.
- [3] R. C. Temps, K. L. Coulson, "Solar radiation incident upon slopes of different orientations". *Sol. Energy*. Vol. 19. No. 2. 1977. Pp. 179–184.
- [4] R. Eke, A. Senturk. "Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed PV system". *Sol. Energy*. Vol. 86. No. 9. Sep. 2012. Pp. 2665–2672

- [5] A. Al-Mohamad, "Efficiency improvements of photo-voltaic panels using a Sun-tracking system". *Appl. Energy*. Vol. 79. No. 3. Nov. 2004. Pp. 345–354.
- [6] R. G. Vieira, F. K. O. M. V. Guerra, M. R. B. G. Vale, M. M. Araújo, "Comparative performance analysis between static solar panels and single-axis tracking system on a hot climate region near to the equator". *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 64. 2016. Pp. 672–681.
- [7] M. R. Mojallizadeh, M. Badamchizadeh, S. Khanmohammadi, M. Sabahi, "Designing a new robust sliding mode controller for maximum power point tracking of photovoltaic cells". *Sol. Energy*. Vol. 132. Jul. 2016. Pp. 538–546.
- [8] A. D'Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment". *Behav. Res. Methods*. Vol. 44. No. 2. 2012. Pp. 305–313.
- [9] D.-R. Chen, K.-F. Chiang, "Cloud-based power estimation and power-aware scheduling for embedded systems". *Comput. Electr. Eng.* Vol. 47. Oct. 2015. Pp. 204–221.
- [10] W. E. Boyson, J. A. Kratochvill, D. L. King, "Photovoltaic array performance model". Sandia National Laboratories. No. SAND2004–3535. 2004.

## **7. Autores**

Dr. José Sebastián Gutiérrez Calderón obtuvo su doctorado en Ingeniería con especialidad en cables eléctricos aislados de alta tensión por la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Navarra, San Sebastián, España.

Dr. Pedro Manuel Rodrigo Cruz obtuvo su doctorado en Ingeniería con especialidad en sistemas fotovoltaicos de concentración por la Universidad de Jaén, España.

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DRON DE BAJO COSTO PARA ADQUISICIÓN DE DATOS DEL CLIMA**

## ***Israel Santoyo Luévano***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*israel.santoyo.luevano@gmail.com*

## ***Javier Isaac Cázares Vieyra***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*isaac.cazaressv@gmail.com*

## ***Carlos Avilés Cruz***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*caviles@azc.uam.mx*

## ***Juan Villegas Cortez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*juanvc@azc.uam.mx*

## ***Arturo Zúñiga López***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*azl@azc.uam.mx*

## **Resumen**

En este artículo se muestra la primera etapa de construcción de un dron que permite obtener, mediante sensores, datos sobre temperatura y humedad del entorno, indicando la ubicación geográfica de cada dato con un módulo GPS y almacenando los datos en una tarjeta MicroSD. El control a distancia del dron se realiza mediante comunicación Bluetooth, usando dispositivos con sistema operativo Android, y la tarjeta open source CC3D. El fin es utilizar el dron en el campo de investigación de recolección datos del clima, indicando la posición de cada punto del entorno, con bajo costo y rápida implementación, como tradicionalmente se hace. Se decidió construirlo debido a que los drones que se

comercializan sólo tienen captura de imágenes o video en tiempo real, y su uso es de gran utilidad para nuestra sociedad en el monitoreo inmediato del clima ante posibles situaciones de revisión inmediata.

**Palabra(s) Clave(s):** Drones, Sensores, Sistemas Mecatrónicos, Teleoperación.

## **1. Introducción**

En estos últimos años, se ha visto un gran desarrollo en vehículos, no tripulados (UAV Unmanned Aerial Vehicle también conocido actualmente como “Dron”), donde sus aplicaciones se centran por ejemplo en tareas que se desarrollan en entornos de difícil acceso o que representan algún peligro, actividades de vigilancia y seguimiento o reconocimiento geográfico [1].

Actualmente existen varios proyectos que abordan la construcción de un dron, algunos se ayudan de proyectos de código abierto y estos pueden estar orientados a la plataforma hardware y/o software. Ejemplos, en [3] se muestra la recolección de datos con ayuda de drones, tenemos la teledetección por satélite, la cual es una manera eficaz de controlar vastas extensiones de glaciares y campos de nieve globales. Otro ejemplo se presenta en [5], donde fuertes precipitaciones pluviales provocaron un gran flujo de tierra de varios millones de metros cúbicos en un pequeño pueblo, y se utilizó un UAV para la evaluación periódica del proceso de deslizamiento de tierra. En [2], muestra que la aplicación del UAV resultó ser una herramienta de costo y tiempo efectivo, para el análisis de deslizamiento de tierra y su monitoreo, que proporciona a los investigadores e ingenieros con precisión de alta resolución datos geográficos; en otro trabajo podemos ver que la teledetección desde vehículos aéreos no tripulados, ofrece una oportunidad para cerrar la brecha entre las mediciones en tierra fina a escala y, observaciones a amplia escala de aviones y satélites convencionales utilizando un UAV. En [4], los UAV se han utilizado para observar la temperatura en la capa límite atmosférica, en las inmediaciones de la estación espacial Muerdo, en la Antártida, durante enero y septiembre de 2012; en [7], podemos ver los sistemas de navegación en los que se proporcionan velocidad y altitud, ya que son cruciales para el control de estabilización de los UAV.



En este trabajo se explica el diseño y construcción de un dron de bajo costo y una implementación en un plazo corto, con el fin de añadir dispositivos de sensado en el dron, que permitan obtener información en zonas de riesgo, y generar una base de datos que permita actualizar o desarrollar planes de protección civil en zonas geográficas específicas.

El proyecto y construcción de nuestro dron propuesto dispone de un diseño ligero, así como de motores brushless (sin escobillas), utilizados para drones de carrera. Para la adquisición de datos tenemos un sensor de temperatura, un sensor de humedad, un par de módulos de GPS y otro módulo MicroSD, para el almacenamiento de la información recabada por los sensores [6].

## **2. Desarrollo**

En esta primera etapa se propone realizar el diseño y la construcción de un dron de 4 motores, cuyas partes posteriormente podrán ser fabricados en una impresora 3D, para después crear los moldes para hacer las piezas en fibra de carbono, o para utilizar una cortadora láser si se utiliza algún otro material como es el caso de este proyecto. Al realizar el diseño del dron, debemos tomar en cuenta cuales materiales serán los más adecuados para su construcción. Con esta consigna, se opta por escoger materiales que sean resistentes y al mismo tiempo su peso sea el menor posible, para poder tener un mejor desempeño de todo el sistema.

### **Diseño del chasis**

Utilizando el software de CAD 3D Inventor Professional de Autodesk, se crean las piezas en un dibujo de un solo plano, y con las herramientas del programa se les proporciona volumen de tal forma que podemos crear los archivos, que posteriormente se pueden imprimir en una impresora 3D u obtener de una placa con una cortadora láser. El chasis está conformado por las piezas que se muestran en la figura 1:

- a) Base superior para GPS.
- b) Pared frontal para colocar la cámara.

- c) Brazo para motores.
- d) Base inferior para proteger la placa de distribución de energía.
- e) Base inferior principal.
- f) Base superior principal.

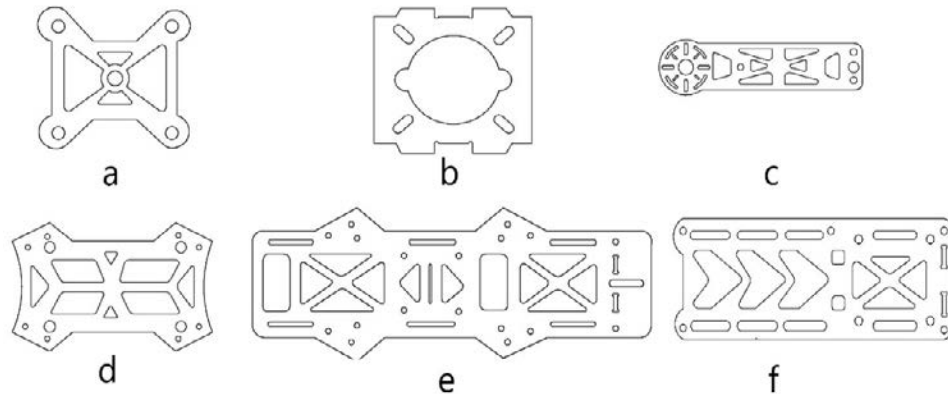


Figura 1 piezas que conforman el chasis del dron.

### **Materiales y construcción**

En la construcción planteada contemplamos únicamente el chasis, para ello usamos hojas de sintra espumado, es un material liviano y se puede pintar, imprimir, grabar o fresar, y resulta ser una excelente protección al impacto, además se pueden construir estructuras fácilmente, debido a que se puede cortar con trinchete, perforar, taladrar, pintar, pegar, etc.

Para poder obtener los cortes de cada pieza se decidió utilizar una cortadora láser, con ella conseguimos cortes más exactos de la placa de sintra, que no solo son imprescindibles para el acoplamiento de las piezas del chasis, sino que también se lograron los cortes que permiten disminuir el peso de cada pieza sin comprometer su rigidez como se muestra en la figura 2, lo cual es un punto crucial al realizar la construcción de un dron, porque permite obtener una mejor eficiencia de nuestros motores, además de facilitar la construcción ya que no se requirió de hacer moldes para la fabricación de las piezas, ahorrando costos extras.

Los componentes a montar son: los motores, las hélices, los variadores, y la batería. A continuación, damos detalle de cada uno con el fin de poder brindar la pauta de alguna modificación futura.



Figura 2 Piezas construidas a partir del diseño de la figura 1.

### Componentes de vuelo

**Motores.** Básicamente hay dos tipos de motores, con escobilla y sin escobilla (brushless), estos últimos tienen la ventaja de ser mucho más eficientes. En este prototipo se utilizan un par de motores, modelo MT2204-2300KV CW (en sentido de las manecillas del reloj) y otro par de motores, modelo MT2204-2300KV CCW (sentido anti-horario), de la marca E-MAX, todos de tipo brushless de corriente continua; cada motor tiene un peso de 25 gr, empuje (Thrust) de 440 gr utilizando hélices de 6x3, una constante KV de 2300 (velocidad del motor), lo que genera 16300 RPM, una potencia de 138 Watts, y una corriente máxima de 15 Amperes.

**Hélices.** Las hélices que usamos son de tamaño 6x3, esta nomenclatura nos dice que el primer número nos indicará su longitud en pulgadas (largo de las aspas), y el segundo su paso (la distancia que recorre al finalizar una vuelta); este valor es importante porque nos indica la distancia que recorre la hélice al dar una vuelta completa.

Usando la teoría de pala o BEM por sus siglas en inglés (Blade element momentum), tanto las fuerzas de empuje como el torque de arrastre producidos por las hélices, son calculados con ecuaciones 1 y 2.

$$F_E = C_E \rho D^4 \omega^2 \quad (1)$$

$$Tor = \frac{C_P \phi D^5 \omega^2}{2\pi} \quad (2)$$

Donde:

$F_E$  Fuerza de empuje. [lbf]

$C_E$  Coeficiente de empuje.

- $D$  Diámetro hélice. [ $ft$ ]  
 $\omega$  Velocidad de rotación de la hélice. [ $rps$ ]  
Tor Torque de arrastre. [ $lbft$ ]  
 $\varphi$  Densidad del aire. [ $\frac{Slug}{ft^2}$ ]  
 $C_p$  Coeficiente de potencia.

**Variadores.** Conocidos también como ESC por sus siglas en inglés (Electronic Speed Controller). Estos son circuitos que se encargan de generar una señal trifásica que alimenta al motor. La velocidad de giro lo determina una señal PWM (modulación por ancho de pulsos) de entrada, en nuestro caso tenemos variadores Simon de 12 Amperes, con un peso de 9 g.

**Batería.** Los motores sin escobillas nos permiten obtener un gran rendimiento y también una gran potencia, el costo de estos beneficios son un elevado consumo. Debido a esto optamos por utilizar una batería Li-Poli (polímero de litio), que es una batería con poca densidad de energía y con la característica de poder entregar una gran cantidad de potencia, ya que los motores brushless necesitan del orden de 10 A a 11 v. Esta batería se define por el número de celdas (S), la tasa de descarga (C), y su capacidad. En nuestro caso son 3S / 30C / 1500 mAh lo cual nos está indicando que tiene 3 celdas (11.1 volts), una tasa de descarga de 30C y una capacidad de 1500 mAh.

Las especificaciones de la batería nos permiten saber el tiempo de vuelo de nuestro dron usando la ecuación 3.

$$T = \frac{C}{P} \quad (3)$$

Donde T es el tiempo de vuelo (min), C es valor de la corriente de la batería en horas (mAh), y P es el consumo total de los motores (mA).

$$T = \frac{1500 \text{ mAh}}{6400 \text{ mA}} = 0.23 \text{ horas} = 14 \text{ min}$$

En comparación con el dron Bebop 2, de la compañía Parrot de cuatro rotores y una batería de 2700 mA, tiene una autonomía de vuelo de 25 minutos, y un precio de lista de \$549.00 USD.

### Tarjeta CC3D (Control de vuelo)

En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques de las interconexiones de la tarjeta CC3D con los ESC, y el módulo de Bluetooth para la configuración.

El control de vuelo se realiza utilizando la tarjeta de control de vuelo CC3D, la cual es Open Source hardware y tiene las siguientes características del controlador de vuelo, mostradas en la tabla 1. La placa de control de vuelo nos permite la conexión directa de un módulo Bluetooth, y con este podemos controlar las funciones de vuelo del dron desde una computadora tipo PC, o como es el caso de este proyecto con la aplicación de OpenPilot lo cual permite realizar pruebas de vuelo de forma más rápida.

Tabla 1 Características del controlador de vuelo.

	<b>Componente</b>	<b>Descripción</b>
1.	Microcontrolador STM32	32-bit microcontrolador funciona a 72MHz, y puede alcanzar a 25 DMips / MHz, cuando el rendimiento es 0 de espera de acceso de memoria de estado.
2.	Integrados en la placa	MPU6000 (3 ejes giroscopios de alto rendimiento y de 3 ejes acelerómetro de alto rendimiento), con 16 millones de IC.
3.	Conexiones de apoyo	GPS y transmisión de datos.
4.	Alimentación	5V.
5.	Salidas	Seis salidas PWM que van a los servos.
6.	Mainport	JST-SH 4-pin permite la telemetría con velocidad de transmisión ajustable, opcionalmente se pueden conectar receptor de satélite o GPS.
7.	Flexi-port	La configuración por defecto no utiliza este puerto, pero puede ser utilizado para la telemetría, GPS, SPEKTRUM receptores de satélite.
8.	Puerto receptor	JST-SH 8-pin. El receptor puerto puede actuar como un puerto de Entrada o salida dependiendo de la configuración que se encuentra en el hardware.

En el diagrama a bloques mostrado en la figura 3, se explica la interconexión de todos los módulos, ahí se muestra la tarjeta de control de vuelo CC3D y sus diferentes puertos de interconexión.

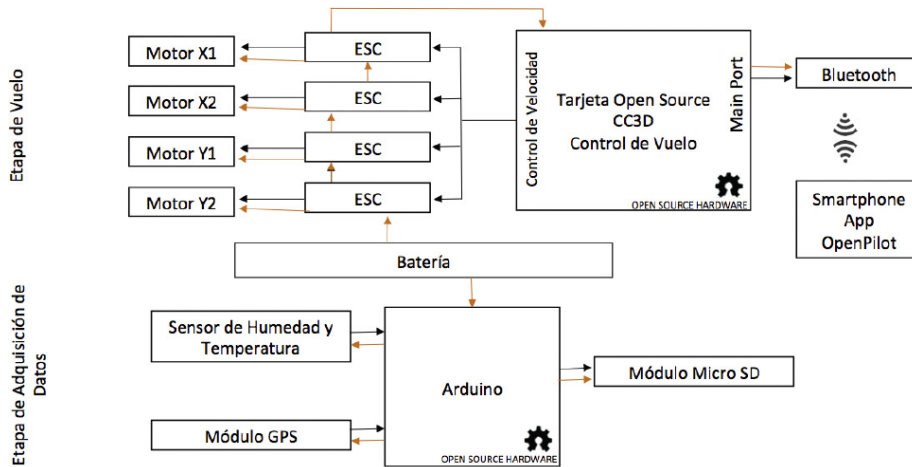


Figura 3 Diagrama a bloques de la interconexión de los módulos.

Utilizando el programa LibrePilot para smartphones (SO Android), se realiza la conexión al *main port* de la tarjeta CC3D el modulo Bluetooth, y la configuración para la comunicación es realizada con la aplicación, lo que permite su control de vuelo, como se muestra en figuras 4 y 5; debemos aclarar que el software para el ordenador es LibrePilot pero la aplicación para Android en smartphones continua con el nombre anterior que es OpenPilot.

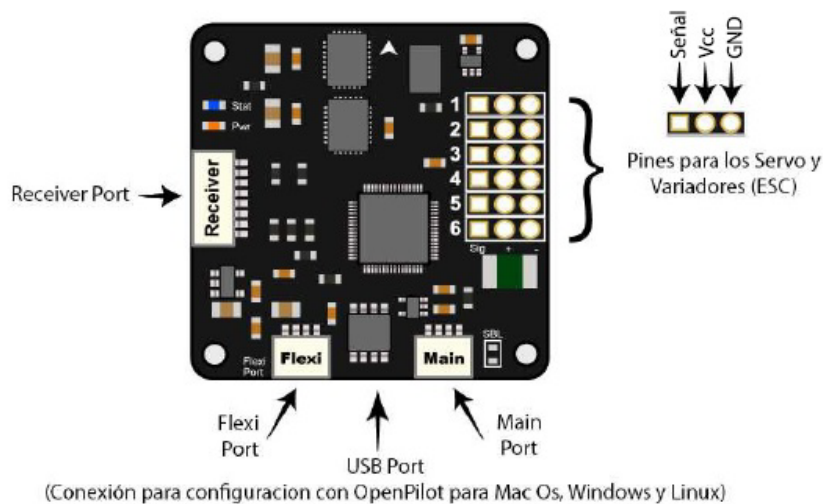


Figura 4 Tarjeta de control de vuelo.



Figura 5 Aplicación OpenPilot para Android.

Unas características importantes del diseño de un dron son: la disposición simétrica y la rotación asimétrica para cada par de motores; esto le permite equilibrarse aplicando rotaciones iguales (en el número de motores que se implementen 4, 6, 8, etc.).

### Ángulos de navegación

Hay que considerar que para lograr un desplazamiento debemos modificar los valores de los ángulos de navegación del dron: Pitch, Yaw y Roll. En la figura 6 se muestra la dirección que debe tener cada motor (en sentido horario y anti-horario), así como también la dirección que se pretende obtener en el vehículo al variar los ángulos de navegación. Para incrementar o aminorar los ángulos de navegación, se debe modificar la velocidad de los rotores de forma individual, para conseguir los movimientos deseados por el dron en el aire. Para lograr en ascenso y descenso del dron, hay que aumentar o disminuir la velocidad de los cuatro rotores al mismo tiempo.

Para el ángulo Pitch, que permite obtener los movimientos de avanzar o retroceder, debemos aumentar la velocidad de los rotores frontales para avanzar y para obtener un retroceso aumentar la velocidad de los rotores traseros.

Para el ángulo Roll, que permite obtener un desplazamiento hacia la derecha (esto se logra al aumentar la velocidad al mismo tiempo de los rotores izquierdos), o a la izquierda del dron, esto se logra al aumentar la velocidad al mismo tiempo de los rotores derechos.

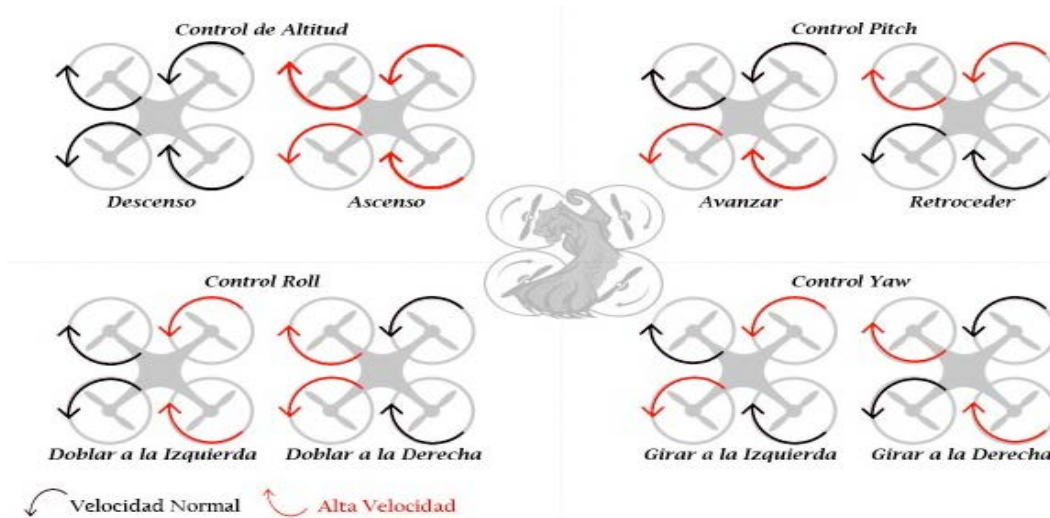


Figura 6 Ángulos de navegación para los 4 motores de nuestro dron propuesto.

Para el ángulo Yaw, que permite rotar sobre su propio eje hacia la derecha o izquierda, el cual logramos al aumentar o disminuir la velocidad de los rotores.

### **Etapas de adquisición de datos: implementación de Arduino**

Se propone utilizar la tarjeta Arduino mega, por ser de bajo costo, contar con un micro controlador atmega328, un IDE gratuito, cuatro puertos seriales (ya que la comunicación del GPS y del módulo MicroSD es serial), y para este trabajo se necesitan al menos de 2 puertos de este tipo. Adicionalmente, se utiliza un sensor para determinar la temperatura y la humedad del medio ambiente, modelo DHT11, y de incorporar el GPS GTPA010 y el módulo MicroSD. La programación se hace en el IDE de Arduino, para que éste realice la comunicación con cada uno de los dispositivos, registre por intervalos de tiempo la temperatura y la humedad, nos proporcione la posición actual y, con los datos recabados, éstos se guarden en el módulo MicroSD, que está montado en el chasis del dron.



## El GPS

Se utiliza un GPS modelo GTPA010, conectado al Arduino mega. Esto se realiza conectando el pin *Tx* del GPS al *Rx* (pin 0) y el pin *RX* del GPS al pin *Tx* del (pin 1), y los pines *VCC* y *GND* del GPS a 5 V, y *GND* respectivamente, con ello nos va a mostrar la ubicación mediante lecturas de latitud y longitud. Los datos recabados por el GPS se envían al Arduino, y este los almacena en la tarjeta micro SD.

## Sensor de humedad

Se usa un sensor DHT11, ya que funciona como sensor de humedad relativa y de temperatura. Este se conecta el pin central del sensor al pin 2 del Arduino, y los pines exteriores a 5 V y *GND*.

## Módulo tarjeta MicroSD

Para el almacenamiento de datos se utiliza un módulo para tarjetas MicroSD, los datos recabados por los sensores se envían al Arduino y este crea un fichero de texto plano (TEMPE.TXT), y de esta forma los datos de los sensores se van acumulando en la tarjeta microSD. En la figura 7 se muestra la conexión del Arduino mega con el sensor dht11, el GPS y el módulo MicroSD.

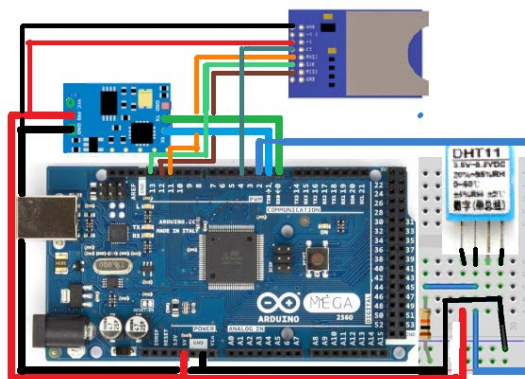


Figura 7 Implementación de circuitería de Arduino con los dispositivos descritos.

La Arquitectura de programación del funcionamiento del Arduino, el sensor de temperatura y humedad, y el módulo MicroSD se muestra, en la figura 8.

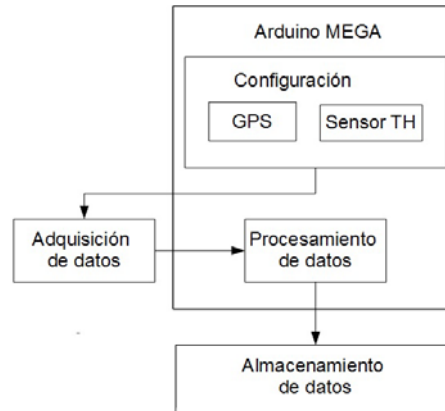


Figura 8 Arquitectura de programación.

### 3. Resultados

En la figura 9 se muestra el dron terminado. Con motores variadores de velocidad y hélices obtenemos un empuje de 440 g por motor, lo que nos permite poner en vuelo un peso aproximado de 1,760 g según las especificaciones de los motores, trabajando en el límite máximo de los dispositivos. Con ayuda del software LibrePilot limitamos el máximo de RPM de los motores, debido a la diferencia de amperaje entre la demanda de los motores y los variadores, para evitar que estos últimos sufrieran un daño. Para la etapa de control de vuelo utilizamos un módulo Bluetooth, conectado al puerto *main* de la tarjeta CC3D, que junto con la aplicación de OpenPilot (recordemos que este último continúa manteniendo el nombre del proyecto anterior a LibrePilot), un Smartphone (SO Android) nos permite controlar el vuelo del dron, con un rango de alcance de aproximadamente 10 metros.



Figura 9 Dron terminado.

Después de ejecutar los programas en el IDE de Arduino, se genera el archivo en donde se muestra la temperatura medida en grados centígrados (°C), el porcentaje de la humedad relativa, y la posición, tal que el GPGSA nos indica que hay recepción del satélite, GPSV datos satelitales detallados, GPGLL nos da la latitud, GPRMC nos da los datos mínimos recomendados, GPVTG nos da la trayectoria vectorial y velocidad sobre el suelo, GPGGA corrige datos, de los cuales podemos obtener latitud de N 53° 18,26\*17 y longitud N 64° 99.99\*30, tal como se muestra un ejemplo en la figura 10.

```
Temperatura:
19.00
Humedad:
57.00

$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPSV,1,1,02,16,,,22,18,,,26*71
$GPGLL,,,,,V,N*64
$GPRMC,,V,,,,,,,,,N*53
$GPVTG,,,,,,,,,N*30
$GPGGA,,,,,0,00,99.99,,,,,*48
$GPGSA,A,1,,,,,,,,,,,,,99.99,99.99,99.99*30
$GPSV,1,1,02,16,,,21,18,,,24*70
$GPGLL,,,,,V,N*64
$GPRMC..V.....N*53
```

Figura 10 Ejemplo de generación de archivo generado por el Arduino.

#### 4. Conclusiones

Hemos logrado la implementación real del diseño y construcción de un dron de bajo costo, para la adquisición de datos del clima, considerando que el costo de un UAV comercial lo más parecido al nuestro, pero que no realiza nuestras tareas de medición de clima, tiene un costo aproximado de \$10,815.3 MXP o \$549 USD, y nuestro costo total es de \$142.13 USD, i.e., apenas por la 4ta parte del precio comercial logramos un dron eficiente, de construcción académica y que a este día no está disponible de forma comercial. Nuestra implementación de software y hardware Open Source nos permite en un corto plazo poner en vuelo un UAV, con los dispositivos como motores, variadores de velocidad de bajo peso y gran eficiencia, junto con tarjetas de control de vuelo como la CC3D, donde podemos conectar más periféricos que pueden ser controlados en la misma tarjeta,

logramos acelerar el uso o la implementación del dron para otras tareas, como las que se le asignaron en esta primer etapa a nuestro dron.

En esta etapa del desarrollo del dron se logró la incorporación de los módulos GPS y de sensor de temperatura y humedad, esto nos permitió recabar información del clima asignándoles su ubicación geográfica, para cada muestra que se tome y, al guardarla en una tarjeta MicroSD, que se pueda conformar una base de datos que permita actualizar o desarrollar planes de protección civil en zonas geográficas específicas.

Como trabajo a futuro inmediato, una segunda etapa, el control se puede llevar a cabo conectando un módulo de comunicación RX, con el que se puede tener un alcance aproximado de 50 km, en comparación al alcance obtenido de 10 metros con el módulo Bluetooth, e incorporar una cámara digital, para ver las imágenes y lograr un control con mayor alcance de nuestra vista y cubrir un área mucho mayor con los datos obtenidos por los sensores y los del GPS en tiempo real.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] A. Bhardwaj, L. Sam. Akanksha, F.J. Martines-Torres, R. Kumar, "UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects". Scopus, Remote Sensing of Environment. Vol. 175. March 2016. Pp. 196-204.
- [2] R. G. Acuña Gonzalez, J. Tao, D. Breen, S. Pointing, L. Gillman, R. Kette, "Robust segmentation of aerial image data recorded for landscape ecology studies". Scopus, 7th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, PSIVT Vol. 9555. 2015.
- [3] W.R. Bolton, "Operational experience of the atmospheric radiation measurement unmanned aerospace vehicle program". In: Scopus, 1st UAV Conference 2002. Portsmouth, VA. 2002.
- [4] J.J. Cassano, "Observations of atmospheric boundary layer temperature profiles with a small unmanned aerial vehicle". Scopus, Antarctic Science. Vol. 26. Issue 2. 2013.

- [5] G. Lindner, K. Schraml, R. Mansberger, J. Hübl, "UAV monitoring and documentation of a large landslide". Scopus, *Applied Geomatics*. Vol. 8. Issue 1. March 2016. Pp. 1-11.
- [6] J. J. Rosales, M. Toledo, L. Bonardi, A. Paolinelli, I. Alcantarilla, A. Cruz, M. M. Romay, "Development of a UAV low-cost navigation system prototype for ATM applications". In: Scopus, 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. 2009. Pp. 1082-1090.
- [7] S. Zhao, F. Lin, K. Peng, X. Dong, B. M. Chen, T. H. Lee, "Vision-aided estimation of attitude, velocity, and inertial measurement bias for UAV stabilization". Scopus, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. Vol. 81. Issue 3. March 2016. Pp.531-549.

## **6. Autores**

C. Israel Santoyo Luévano es estudiante de Ingeniería Electrónica, en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, su área de especialización es Mecatrónica. Actualmente trabaja en su Proyecto Terminal orientado al Diseño y construcción de un dron de bajo costo para la adquisición de datos del clima.

Ing. Javier Isaac Cázares Vieyra es recién egresado de Ingeniería Electrónica, en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, su área de especialización es Mecatrónica. Actualmente continúa su trabajo que inicio en su Proyecto Terminal orientado al Diseño y construcción de un dron de bajo costo para la adquisición de datos del clima.

Dr. Carlos Avilés Cruz es Profesor-Investigador del Departamento de Electrónica, en el área de Instrumentación, en la UAM Azcapotzalco. Actualmente trabaja en las áreas de investigación del Reconocimiento de Patrones, Visión por computadora y Análisis de señales.

Dr. Juan Villegas Cortez es Profesor-Investigador del Departamento de Electrónica, en el área de Instrumentación, en la UAM Azcapotzalco. Actualmente realiza investigación en el área de Memorias Asociativas, Visión por computadora y Procesamiento digital de imágenes.

M.C. Arturo Zuñiga López es Profesor-Investigador del Departamento de Electrónica, en el área de Instrumentación, en la UAM Azcapotzalco. Actualmente realiza investigación en el área de Redes de computadoras, Sistemas embebidos y Procesamiento digital de imágenes.

# **SISTEMA MECÁNICO-ELECTRÓNICO DE MEDICIÓN Y CONTROL DE PARÁMETROS DINÁMICOS EN FORMACIONES FERROVIARIAS**

***Miguel Antonio Ojeda***

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

*miky@miky.com.de*

***Ricardo Mario Amé***

Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Facultad de Ingeniería

*ingricardoame@gmail.com*

## **Resumen**

El control de la velocidad y posicionamiento geográfico exacto de las formaciones ferroviarias es un problema que se presenta a menudo. La importancia del mismo deriva en la necesidad de garantizar la calidad del servicio y la seguridad de las personas y mercancías que se transportan. Adicionalmente, el control de las aceleraciones en seis sentidos, combinado con el posicionamiento geográfico, permite efectuar un relevamiento automático del tendido de las trayectorias férreas, y la profesionalidad de la conducción [1]. En este trabajo se explica el desarrollo de un equipo mecánico-electrónico que permite la medición de una serie de parámetros para la mejora de la calidad y seguridad del servicio ferroviario, sin que ésta sea una aplicación taxativa.

Tensiones eléctricas, corriente eléctrica, presión de líneas de frenado, aperturas de puertas , sistemas de emergencia, Caudales de combustible , capacidad de colocar hasta 65000 sensores que funcionan en formato Máster Slave con comunicación RF433 dentro de toda la formación ferroviaria. Las mediciones a realizar son referidas no solo a las relacionadas a la aceleración, frenado posicionamiento global, velocidad, sino a todos los parámetros eléctricos y mecánicos dentro de la cabina de conducción y mediante comunicaciones

radioeléctricas se colecta información de los diferentes vagones de la formación. esta información es almacenada visualizada y se envía en tiempo real a la oficina central Mediante comunicación telefónica GPRS esta información es almacenada en una FTP la cual podrá ser utilizada en tiempo real desde internet en cualquier lugar del planeta.

Contando a su vez de diferentes canales de comunicación que pueden sincronizarse con sistemas de señalización especialmente adaptados para este fin y/o sistemas de frenado que aumentan la seguridad. Además, cuenta con un sistema de comunicación GSM GPRS entre cabinas de diferentes formaciones lo cual nos permite ante una emergencia estar 100 % comunicados

Se desarrolló un sistema de visión binocular y un RADAR del tipo SAR (radar de apertura sintética) para la detección y monitoreo de vía libre de obstáculos. El equipo básico consta de dos conjuntos: uno, sensor de frecuencia de giro y aceleraciones, con posicionamiento geográfico, memoria, procesador [2] y emisor de señal inalámbrico; el otro es el receptor remoto que permite observar en una pantalla la información completa relevada.

El emisor se coloca en la rueda de la máquina locomotora y el receptor en la cabina del conductor. Éste último aporta datos a las imágenes de vídeo, normalmente captadas por las cámaras instaladas en la formación, completando una muy valiosa información para casos de accidentes. El equipo final cuenta con sistemas especialmente diseñados para aumentar la seguridad en el transporte, funciones redundantes, súper compacto, pantalla touch, salida de video barios sistemas de almacenamiento de datos indestructibles comparándolos con lo que se denomina caja negra. (Almacenamiento dinámico de toda la información de la cabina incluido audio de las comunicaciones) necesarios para un peritaje en el caso de accidentes

Comunicaciones RS232, RS422, RS485, CAN, Bluetooth2.0, Bluetooth 4.0, RF433 lora (Long range) llegando a una distancia de más de 5.000 metros garantizando la comunicación total dentro de una formación sin necesidad de cableado interno. Creación de múltiples sensores remotos totalmente autónomos para la medición de Velocidad, aceleración, peralte, tensión, corriente, presiones , con



comunicaciones AD4-20 para utilizar cualquier tipo de sensor industrial , adc , dac, conmutaciones, accionamientos, mediciones de caudales , para determinar consumos de diferentes fluidos, mediciones de temperatura, similar a las prestaciones de una ECU automotor.

Entradas Analógicas y digitales I2c, SPI, TTL, I2s, accionamiento de servo y motores paso a paso para el control de válvulas y demás procesos que requieran de un control de velocidad PWM. El dispositivo ha merecido una solicitud de patente, se ha probado exitosamente y está en período de desarrollo industrial.

**Palabras Claves:** Electrónica industrial, mecatrónica, microcontroladores ARM, procesamiento de señales, seguridad ferroviaria.

## 1. Introducción

La necesidad de conocer la velocidad de traslación de los objetos es muy antigua. Hacia principios del siglo XIX se inventa el “Tacómetro”, aparato diseñado para medir el número de vueltas de un eje; si éste está asociado a una rueda, conociendo su diámetro es suficiente para determinar la velocidad lineal del conjunto. Con tecnología moderna, continúa siendo utilizado.

A finales del siglo XIX, aparece el “Velocímetro”, que mide la rapidez de traslación de un objeto. Originariamente, consistía en un eje flexible, unido a un sistema de engranajes vinculados a alguna parte de la transmisión mecánica, un imán y una bobina excitada por éste para generar una señal de pulsos eléctricos; actualmente, es un aparato electrónico generador de pulsos con una frecuencia vinculada a la velocidad de giro del elemento controlado.

En vehículos y máquinas industriales se utilizan dispositivos electrónicos llamados “*encoder's*”; circuitos combinacionales que procesan las señales de entrada a datos de salida. Pueden ser ópticos o magnéticos, requiriendo conexión cableada. No se aplican en aquellas instalaciones que estén expuestas a suciedad o impactos.

Las aceleraciones se miden mediante dispositivos electrónicos conocidos como “Acelerómetros”, los cuales también requieren conexión cableada para transmitir la información.

Por último, el “Tacógrafo” complementa a los anteriores. En él es posible almacenar, en memorias digitales, los datos históricos de velocidades, aceleraciones y espacio recorrido por el móvil.

La localización geográfica de un objeto se realiza mediante la determinación de la latitud y longitud terrestres. En ciertas aplicaciones es necesario conocer su ubicación de manera instantánea, con cierto grado de precisión, al mismo tiempo que se mueve. Los modernos sistemas GPS (*Global Positioning System*) pueden establecerla con un error de entre 3 y 5 metros, admisible para ciertos usos, pero inaceptable para la seguridad de una formación ferroviaria. En algunas aplicaciones se utiliza para calcular la velocidad a partir de sucesivas posiciones geográficas correlativas, lo cual induce a la falta de exactitud y de información instantánea.

Si bien todos los elementos descritos son conocidos y ampliamente utilizados, formando parte de los tableros de control de automóviles, vehículos (en general) y ferrocarriles, se los instala de manera independiente entre sí, no combinando adecuadamente la información que generan.

Muchas patentes de invención [3] se han registrado sobre distintos dispositivos para la medición de la frecuencia de giro mediante sensores por efecto Hall, por medio de imanes actuando sobre bobinados, o dispositivos de ultrasonido, actuando sobre el cuerpo que se desplaza, e incluso otros métodos que utilizan señales emitidas por varios satélites que se comunican por radio a un receptor en el vehículo, realizando cálculos de la velocidad.

Otras patentes informan sobre dispositivos que detectan la velocidad y la posición relativa de dos partes de un componente mecánico y no del vehículo respecto del lugar en que se encuentra; y otras que aseguran determinar el desplazamiento mediante la aceleración en distintos ejes.

Todos ellos, si bien pertinentes, ya no tienen la virtud de la actualización generada por el acelerado devenir de la tecnología.

Existe la imprescindible necesidad de modernizar los sistemas de control del movimiento y de localización geográfica, generando datos interrelacionados, en un equipo único, evitando las conexiones cableadas, de modo de impedir

sabotajes, vandalismo y otras circunstancias no deseadas, procesando las señales de manera combinada y transmitiendo los datos por medios inalámbricos, con seguridad y muy alta precisión.

## **2. Objetivos y configuración conceptual del equipo diseñado**

El desarrollo realizado conjuga la configuración de componentes Mecatrónica de control de posicionamiento, parámetros cinéticos y dinámicos, sustituyendo equipos individuales que proveen información dispersa, no armonizada, con la ventaja de independizarse del cableado de todo tipo, de alta velocidad de procesamiento de los datos, confiabilidad constructiva y en la provisión de la información, precisión y combinación racional de ésta.

El equipo cuenta con un algoritmo que permite calcular y medir en todo momento: localización geográfica con extrema exactitud, velocidad y sentido de traslación, aceleraciones en los seis ejes coordenados, procesar los datos de diversos modos (históricos, estadísticos, porcentuales, histogramas, por planimetría, etc.), almacenarlos en la memoria y transmitirlos a otros receptores de manera inalámbrica. Con esta información es posible, además de lo indicado:

- Vincular la velocidad y aceleraciones, con la posición geográfica, el día, la hora, mes y año en que se produjeron.
- Relevar el estado de la infraestructura vial, al vincular las aceleraciones verticales y horizontales con la posición geográfica.
- Vincularla con las imágenes de vídeo, tomadas por las cámaras de seguridad, generando un muy importante complemento informativo.

Estas características -objetivos del diseño- fueron implementadas en varios y sucesivos prototipos (figura 1) y probadas exhaustivamente, superando paulatinamente los inconvenientes que se fueron presentando y mejorando la confiabilidad, calidad y precisión de los datos relevados.



Figura 1 Prototipo.

### 3. Primer prototipo de prueba

La figura 2 muestra el conjunto en sección diametral del primer desarrollo realizado, con la disposición de sus componentes genéricos.

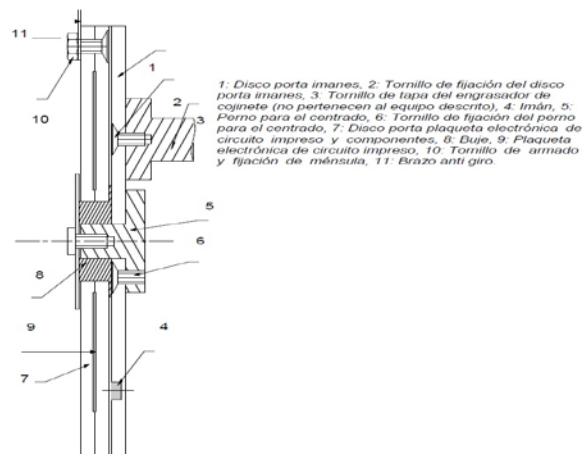


Figura 2 Corte diametral del conjunto con descripción de sus componentes genéricos.

El primer prototipo fue una construcción conceptual y consistía en dos discos independientes, uno que acompañaba el giro del eje a medir y el otro fijo, a unos pocos milímetros de separación del anterior, tomado a una parte estática de la estructura más cercana.

El disco 1 gira solidario con el eje estudio por estar vinculado mediante los tornillos 2, roscados a los tornillos 3, y éstos unidos a un disco de adaptación para las pruebas (no se ve en el dibujo). En el disco 1 se encuentran insertos los imanes 4, dispuestos sobre un determinado diámetro, y separados

angularmente de manera equidistante. El perno 5, unido al disco 1 mediante los tornillos 6, actúa de guía para la alineación correcta del disco 7. Un buje de material plástico 8 facilita el giro relativo entre ambas piezas con un mínimo rozamiento. El disco 7 contiene en su interior el circuito impreso 9. En esta plaqueta electrónica se disponen: un microprocesador; las bobinas que generan energía a partir de los campos magnéticos de los imanes; los detectores inductivos de campo magnético, con los cuales se calcula la frecuencia de giro; los sensores de aceleraciones; sistemas de comunicación; una memoria de capacidad suficiente para almacenar la información de varios meses, un sistema de hora, día, mes y año, y otros accesorios auxiliares. La generación de energía y los medios de comunicación no requieren cableado. Dado que el disco 7 está constituido por dos mitades, se aprovecha el tornillo 10, utilizado para fijar el brazo anti giro, para armar el conjunto. El brazo anti giro 11 inmoviliza al disco 7 contra la instalación.

#### **4. Funcionamiento conceptual**

Cuando el eje de interés comienza a girar, el disco 1 y los imanes pasan, sucesivamente, frente a las bobinas generando inmediatamente tensión de alimentación al circuito. Del mismo modo, el sensor inductivo es influenciado por el campo magnético de los imanes y detecta la frecuencia de giro, por la separación angular entre imanes. La gran cantidad de imanes y su escasa separación aseguran la inmediata detección del movimiento y su precisión, como así también la instantánea generación de energía de alimentación al sistema. Mientras tanto, el microprocesador temporal informa al microprocesador principal los datos de la hora, día, mes y año, del mismo modo que lo hace el posicionado satelital. A medida que la máquina que contiene el eje estudio se mueve y acelera, el detector informa de esta magnitud al procesador. Cuando la velocidad y las condiciones del terreno o de las vías -en la aplicación ferroviaria- lo inducen, los acelerómetros medirán las variaciones de estos parámetros en los tres planos ortogonales y en los seis sentidos. Toda esta información es almacenada en la memoria y/o enviada a un receptor remoto.

## 5. Lógica electrónica conceptual

En la figura 3 se observa el diagrama de bloques del circuito electrónico.

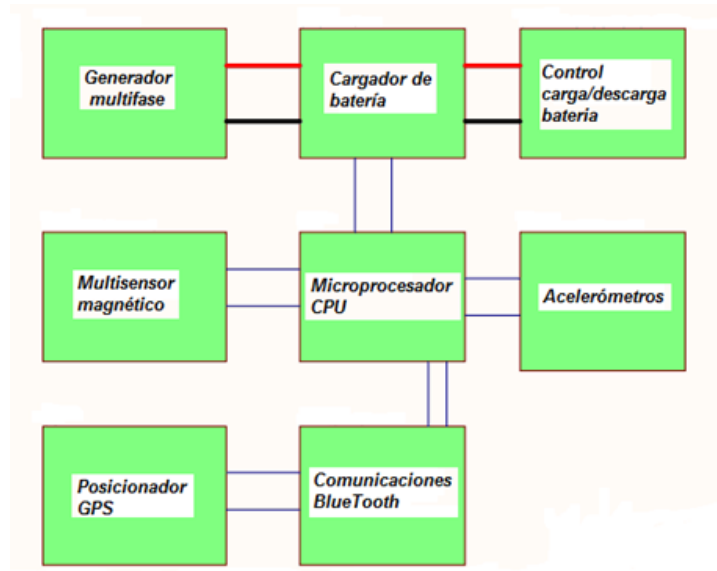


Figura 3 Diagrama de bloques del circuito electrónico.

La figura 4 muestra la plaqueta electrónica, posición 9 de la figura 2, y sus componentes, montada sobre el disco posición 7. En primer plano, se observa un módulo superpuesto conteniendo el procesador ATX mega 256 A3U, y un micro Bluetooth 2.0. La segunda plaqueta consta de un Bluetooth adicional para control de desarrollo.



Figura 4 Plaqueta electrónica de circuito impreso y sus componentes.

La figura 5 muestra un momento del ensayo de funcionamiento del primer prototipo. Se colocó sobre el plato de un torno para simular el giro. El disco

portante de los componentes electrónicos se trabajó con un brazo tomado a la torreta porta herramientas. Las pruebas se realizaron a distintas frecuencias de giro y se recibió la información en una computadora portátil alejada.



Figura 5 El sistema colocado en un torno para simular el giro de la rueda.

En estas verificaciones no se pudo evaluar el funcionamiento de los acelerómetros. En la figura 6 puede observarse la composición de los dos discos que conforman el prototipo.

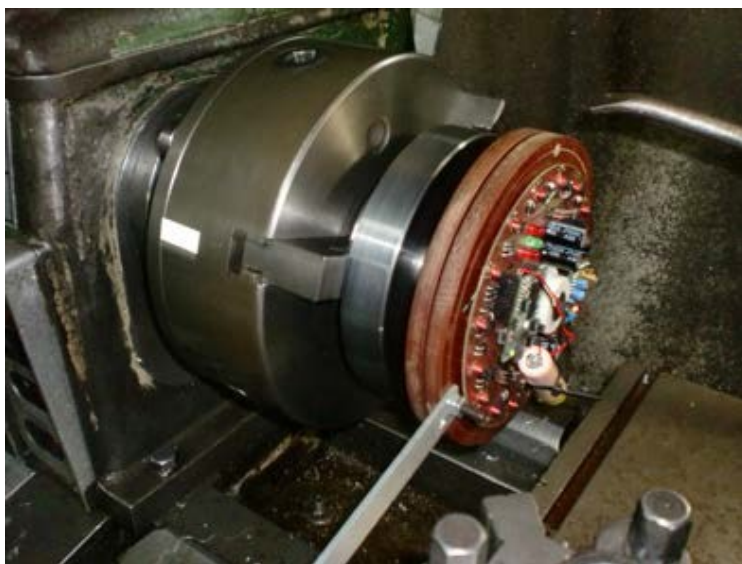


Figura 6 Primer prototipo en pruebas. Se observan las dos placas que lo componen.

Las figuras 7 y 8 muestran la recepción de datos en el procesador portátil, el cual contaba con un software que simulaba el equipo electrónico que, luego, se utilizaría en la realidad. El resultado de los primeros ensayos indicó que el

sistema de relevamiento de la frecuencia de giro funcionaba bien, la generación de energía era insuficiente para el consumo registrado y, además, de construcción relativamente engorrosa. También, se detectó que la transmisión de datos tenía alcance limitado

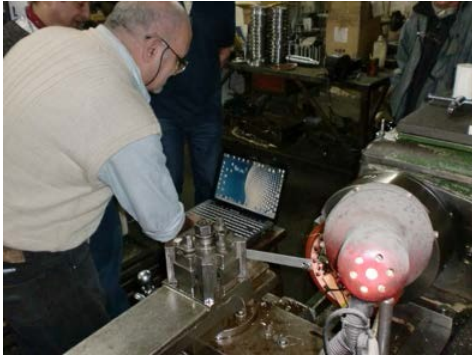


Figura 7 Recepción lejana de señales. Figura 8 Monitor del procesador portátil.

## 6. Segundo prototipo de prueba

Estas debilidades fueron superadas en el segundo prototipo. Éste se instaló en la rueda de la locomotora, aprovechando la disponibilidad de tres tornillos de la caja porta cojinete, como se muestra en la figura 9.



Figura 9 Lugar donde se instaló el segundo prototipo.

La instalación fue realizada por los autores del presente trabajo, como puede verse en la figura 10, en una máquina Diésel de la línea Belgrano Sur, en los talleres de la localidad de Tapiales, provincia de Buenos Aires, Argentina.





Figura 10 Instalación del segundo prototipo en la locomotora.

En la figura 11 puede observarse el segundo prototipo ya instalado en los momentos previos a las pruebas con la locomotora en marcha.



Figura 11 Segundo prototipo instalado en la rueda de la locomotora.

Por otra parte, la figura 12 muestra la plaqueta genérica desarrollada en la Cátedra de Electrónica Analógica y Digital de la carrera de Ingeniería Mecánica orientación Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), utilizada para comprobar el funcionamiento del sistema de Comunicación y el software escrito. En ella puede leerse la recepción de la señal de velocidad de desplazamiento durante el recorrido de prueba llevado a cabo sobre la máquina.



Figura 12 Recepción remota de la señal de velocidad de desplazamiento.

Las condiciones reales de uso requirió de una construcción más robusta, apta para intemperie y, por lo tanto, cerrada. Se incorporó un conjunto de pilas alcalinas que proveían la energía a los sensores, al procesador y al sistema de comunicación. También, una caja adicional para incorporar tres interruptores a los fines de facilitar la operación de coordinación entre emisor y receptor remoto. Los ensayos confirmaron la mejora lograda en las comunicaciones, que permitió mayor alcance, pero con algunas deficiencias en la conexión automática entre emisor y receptor. Además, se comprobó que el paquete de baterías tenía una duración limitada a unas 200 horas continuadas.

## 7. Tercer prototipo de prueba

En el tercer prototipo se mejoraron los componentes del sistema de sensado, el sistema de comunicación y el software de operación, de modo de reducir al mínimo el consumo de energía. La tecnología aplicada consistió en la utilización de procesadores y materiales de excepcionalmente bajo consumo, al igual que la aplicación de circuitos operacionales como el MCP 6272 de baja demanda energética. También se diseñó un pequeño generador consistente en un rotor, con imanes permanentes, y un estator bobinado. La figura 13 muestra el dibujo en corte: 1: Disco de fijación, 2: Árbol principal, 3: Tapa de cierre, 4: Carcasa, 5: Disco porta imanes, 6: Plaqueta electrónica con sensores inductivos, 7: Rodamiento, 8: Rotor del generador, 9: Estator bobinado de generador, 10: Cubierta protectora de generador.

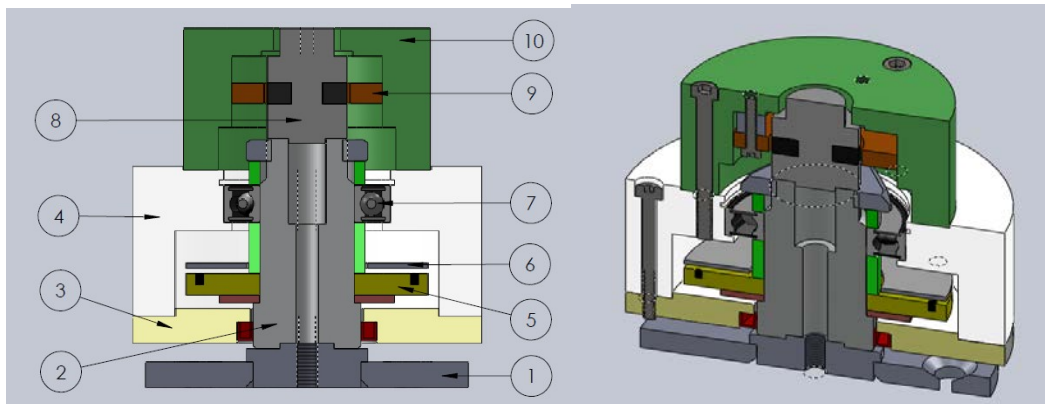


Figura 13 Corte tercer prototipo, vista 3D.

Las piezas 1, 2, 5 y 8 son solidarias a la rueda de la máquina, por lo que giran a la frecuencia de ella. El resto de las partes son inmóviles y se las vincula a la estructura cercana.

Al girar el disco porta imanes 5, el campo magnético de éstos actúa sobre los sensores generando los pulsos de tensión que identifican la frecuencia de giro.

En la figura 14 se ve el prototipo colocado en la rueda de la locomotora. En primer plano el brazo metálico anti-giro y el cable de antena del emisor. Este prototipo presentaba importantes ventajas respecto de los anteriores: mayor robustez y confiabilidad; alta capacidad de transmisión de datos; su nuevo software aseguraba la conexión automática entre el receptor remoto y el emisor; bajo consumo de energía; y facilidad para su montaje, inspección y desmontaje.

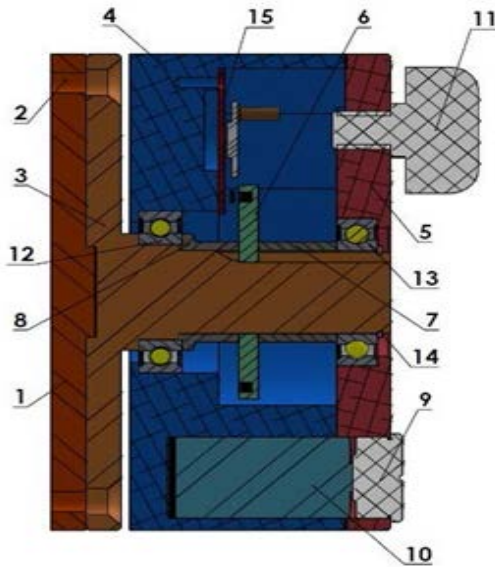


Figura 14 Tercer prototipo colocado en la rueda de la locomotora.

Las pruebas fueron exitosas, pero se dispuso eliminar el grupo generador por ser el factor más sensible en cuanto a desgastes y efectos derivados de las vibraciones.

## **8. Producto comercial**

Finalmente, se construyó el equipo mostrado en la figura 15, que resume la experiencia acumulada en los distintos ensayos realizados sobre los prototipos descritos.



- 1: Disco de adaptación; 2: Ubicación tornillo de fijación;
- 3: Eje; 4: Cuerpo; 5: Tapa; 6: Disco porta imanes;
- 7: Separador largo; 8: Separador corto; 9: Tapón de batería; 10: Batería; 11: Antena multi|direccional
- [4]; 12 y 13: Rodamientos; 14: Anillo elástico de cierre;
- 15: Plaqueta electrónica.

Figura 15 Equipo final.

El diseño preliminar de la pantalla que el usuario observa se muestra en la figura 16. La misma puede adaptarse a distintas finalidades e incluso realizarse con el diseño y datos que se requieran.

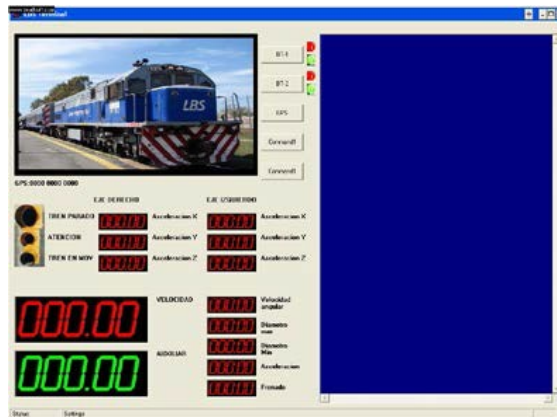


Figura 16 Pantalla de datos.

A posteriori se desarrolló un sistema de vídeo binocular y radar tipo SAR con un Controlador CPU Data logger, con sistemas de comunicación de alta eficiencia y modem telefónicos GPRS 4G y sensores diversos multi propósitos, actualmente en proceso, figuras 17 a 21.





Figura 17 Módulo de captura de vídeo binocular versión VR 3D y radar SAR final.



Figura 18 Unidad central de procesamiento de datos versión V final.



Figura 19 Unidad central de procesamiento desarrollada en la UNLZ.

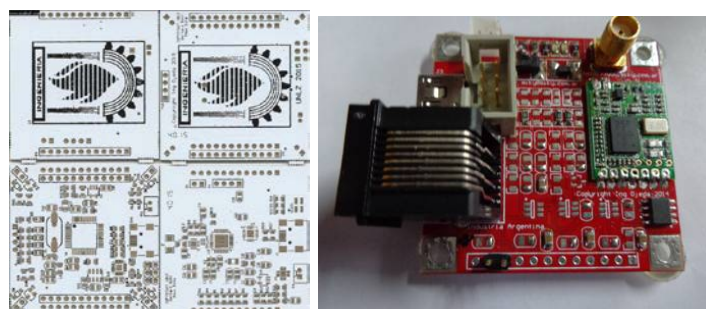


Figura 20 Sensores especiales con comunicación inalámbrica RF433.



Figura 21 Versión mecánica final del control de la velocidad y posicionamiento geográfico.

## 9. Avances Tecnológicos

### Técnicas SAR para la detección temprana de obstáculos en vías

Ante la necesidad de poder tener mayor tiempo de frenado de una formación ante la detección de un objeto en las vías y ante la imposibilidad de usar Cámaras de video en modo nocturno se impulsó la creación de una cámara de video 3D estéreo que además utiliza tecnología SAR, figura 17 para poder monitorear tanto en modo diurno como nocturno el campo visual delante de la locomotora y/o detrás de la misma (vagón de cola). Se aplicó tecnología electrónica avanzada, y la creación de emisores de radiofrecuencia en la banda de los 2 a 4 Ghz para poder realizar una detección de obstáculos a una distancia mayor a los 5 km en línea recta en la figura 22 se puede apreciar un ejemplo de captura de imagen y su procesamiento en 3D y 2D

El resultado es independiente si es de día o de noche y también del nivel de iluminación, la aplicación resultante es apta para detectar obstáculos.

La aplicación de tecnología SAR (figura 23) y el procesamiento de señales nos dan como resultado imágenes de la cual se obtienen señales de Alarma temprana.

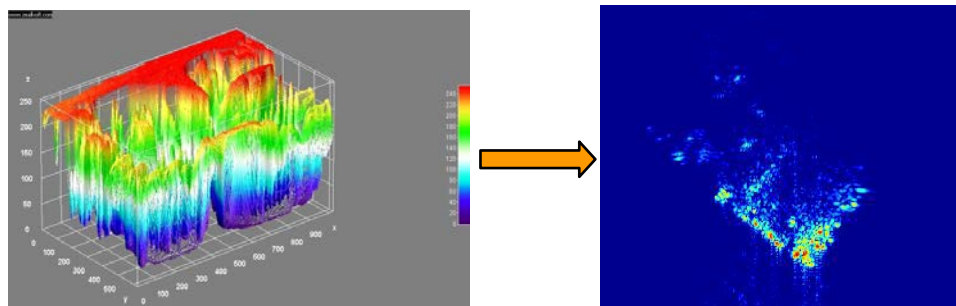


Figura 22 Captura de imagen 3D - SAR de obstáculo.

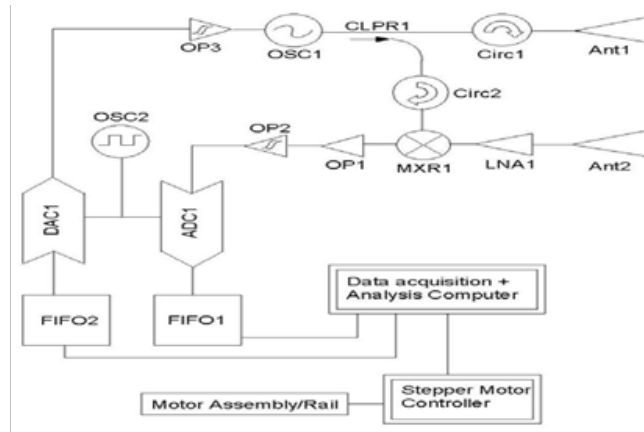


Figura 23 Diagrama en block visor SAR.

## 10. Conclusiones

Se aplicó tecnología electrónica avanzada, combinada con diseño mecánico, para hacer frente a la necesidad de contar con un dispositivo que realizara el relevamiento de parámetros y controles de una formación Ferroviaria su entorno y señalización.

Pudiendo controlar la totalidad de los parámetros involucrados utilizando módulos e interfaces especiales, diseñadas específicamente para cada medición y/o control de dispositivos, como ser velocidad, aceleración, frenado, posición geográfica, voltaje generados o de red, consumo de combustible, presiones, puertas abiertas, líneas de frenos de la locomotora y de cada vagón de la formación sin necesidad de cableado

El equipo desarrollado posee comunicación inalámbrica de largo alcance GSM GPRS, figuras 24 y 25.

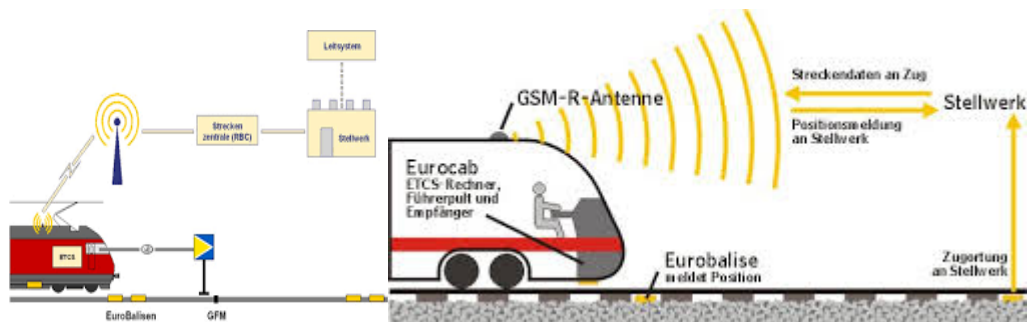


Figura 24 Comunicaciones GSM-GPRS-RF433.

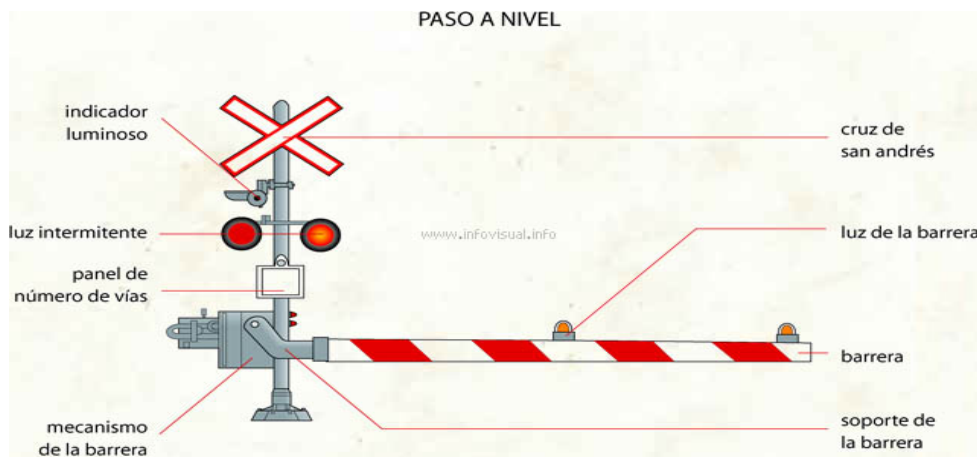


Figura 25 Comunicaciones RF433 con pasos a nivel.

Posibilidad de comunicación con barreras paso a nivel con aviso de status al igual que la comunicación con todo tipo de señalamiento límites de velocidad fijos o variables.

Robustez mecánica y alta confiabilidad; sus componentes y software aseguran muy bajo consumo de energía y ésta es suministrada por una batería de litio de significativa estabilidad de depreciación [5]. Con lo cual se retiene la información ante cortes de energía además se almacena tipo caja negra toda la información de funcionamiento histórica.

El desarrollo fue resultado de un convenio de colaboración entre la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y la empresa Antrieb Sudamericana SA, y derivó en la solicitud de Patente de Invención según expediente N° 20130104206 ante el INPI, Instituto Nacional de la Propiedad Intelectual, Administración Nacional de Patentes, Argentina.

## 11. Bibliografía y Referencias

- [1] J. J. D`Azzo, C. H. Houpis, Sistemas Realimentados de Control (Análisis y Síntesis). 2ª edición. 1975. Paraninfo. Madrid.
- [2] S. Yeralan, A. Ahluwalia, Programming and Interfacing the 8051 Microcontroller. 1995. Addison-Wesley Publishing Company. EE. UU.
- [3] <http://lp.espacenet.com>. 2013-2014.



- [4] RF Solutions LTD. PUK Dual Band Antenna, 433/868MHz. [www.rfsolutions.co.uk](http://www.rfsolutions.co.uk).
- [5] EVE ENERGY CO., LTD. Technical Specification.
- [6] ER34615. [www.evebattery.com](http://www.evebattery.com).
- [7] B. Lovell. *Echoes of War: The Story of H2S Radar*. 1991. Taylor & Francis Group. New York. NY.
- [8] W.G. Carrara, R.S. Goodman, R.M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*. 1995. Artech House. Boston, MA.
- [9] G. L. Charvat, *A Low-Power Radar Imaging System*. 2<sup>nd</sup> Edition. 2007. Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University. East Lansing, MI. 2007.

## **12. Autores**

Miguel Antonio Ojeda Moreno es Profesor Adjunto en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Facultad de Ingeniería, Ciclo Superior de especialización de Ingeniería Mecánica, orientación Mecatrónica. También es Profesor Adjunto en la Universidad Tecnológica Nacional (UTN.BA), Facultad de Ingeniería, orientación Mecatrónica.

Ricardo M. Amé es Profesor Titular Ordinario en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Facultad de Ingeniería. Coordinador del Ciclo Superior de la carrera de Ingeniería Mecánica, orientaciones Mecánica y Mecatrónica.

# HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ENSEÑANZA DE LA ROBÓTICA

## ***Braulio Cruz Jiménez***

Universidad Autónoma de Yucatán  
*braulio.cruz@correo.uady.mx*

## ***Jannette Contreras Rivero***

Universidad Autónoma de Yucatán  
*jannette.contreras@correo.uady.mx*

## ***Ricardo Peón Escalante***

Universidad Autónoma de Yucatán  
*rpeon@correo.uady.mx*

## ***Luis Ricalde Castellanos***

Universidad Autónoma de Yucatán  
*lricalde@correo.uady.mx*

## **Resumen**

En este artículo se presenta el diseño e implementación de una herramienta computacional para el apoyo de la enseñanza de la robótica, la cual permite simular y programar robots antropomórficos de tres grados de libertad de manera virtual; esto se logra a través de la definición de las posiciones de operación del robot por el usuario y escribiendo el código que utilice dichas posiciones. Posee también conexión inalámbrica por medio de Bluetooth, lo que permite la interconexión con dispositivos físicos robóticos de tres grados de libertad. Esta herramienta computacional permite la utilización de una interface visual, facilitando la simulación y programación de robots físicos mediante el empleo de los modelos cinemáticos directo e inverso del robot. Adicionalmente la interface visual permite al usuario desligarse de la complejidad de los lenguajes de programación, debido a que la programación se realiza en modo gráfico, lo que permite focalizarse en el

diseño de la aplicación robótica en lugar de privilegiar la sintaxis del lenguaje de programación del robot.

**Palabra(s) Clave(s):** Cinemática directa, cinemática inversa, interfaz virtual, robótica educativa.

## 1. Introducción

Un simulador robótico es un software para recrear un entorno robotizado sin depender físicamente en el robot real, reduciendo así los costos de desarrollo y mejora de la eficiencia mediante la simplificación del trabajo de desarrollo. Utilizando plataformas de programación modernas, los comportamientos de un robot se pueden simular con gran precisión en comparación con el robot real [1].

La mayoría de los simuladores robóticos se pueden aplicar a los robots actuales sin necesidad de modificaciones importantes. Por otra parte, los sistemas robóticos son cada vez más complejos hoy en día, y los requisitos de rendimiento son más altos, por lo que los simuladores robóticos son de vital importancia en la investigación y el desarrollo de los sistemas robóticos. Por otra parte, los simuladores aplicados en la investigación robótica son altamente eficientes en la verificación de la seguridad, la fiabilidad y la robustez de los algoritmos en desarrollo [2]. En el área de la educación, los investigadores también han demostrado que los estudiantes pueden aprender lenguajes de programación de manera más rápida por medio de un simulador robótico [2]. Existe una gran cantidad de simuladores de robótica hoy en día y se pueden dividir en dos categorías principales: comercial y de código abierto

En [3] se presenta un ejemplo de un simulador comercial llamado Webots, que se utiliza para la creación de prototipos rápidos de robots móviles. Los modelos simulados tienen propiedades personalizadas tales como la masa y la fricción proporcionadas por librerías externas utilizadas para la simulación de dinámica del cuerpo rígido.

Virtual Robot Experimentation Platform (V-REP) es otro tipo de software comercial, consistente en un simulador 3D que se utiliza para simular cualquier robot, especialmente los sistemas de control distribuido, y es una aplicación versátil

compatible con Linux, MacOS y Windows. V -REP también se utiliza para el desarrollo rápido de algoritmos, prototipado rápido y monitoreo remoto [4].

Easy-Rob es un software de simulación para plataformas robóticas en plantas de manufactura que permite al usuario visualizar procesos de operación como manipulación y recubrimiento. Easy-Rob también tiene funcionalidad de generar películas en formato AVI y provee bibliotecas para la importación y exportación de archivos de dibujo [5].

RobotStudio es un simulador que utiliza el lenguaje RAPID en Windows como plataforma de software para robots industriales desarrollados por ABB. Esta plataforma de software permite a los usuarios desarrollar entornos de simulación realistas basados en robots virtuales que son copias exactas del software utilizado en las líneas de producción [6].

Microsoft Robotics Developer Studio (MRDS) es un software en 3D basado en Windows desarrollado por Microsoft para apoyar una variedad de sensores y muchas otras plataformas. Este simulador es compatible con todas las versiones del sistema operativo Windows y también es capaz de simular robots de servicio [7].

Modular Open Robots Simulation Engine (MORSE) es un simulador genérico de código abierto aplicado principalmente en el ámbito académico para simular robots autónomos en ambientes interiores y exteriores. Los programas están escritos en su mayoría como simples scripts de Python [8].

Robot Operating System (ROS) es una plataforma de software distribuido de código abierto para robótica que permite a montar archivos ejecutables en tiempo de ejecución, lo que permite a los investigadores en el campo de la robótica reutilizar los códigos fuente de la comunidad ROS. ROS se basa en el sistema operativo Ubuntu Linux y soporta una variedad de idiomas a través de C ++, Python, Octave, y LISP por medio de un simple lenguaje de definición de interfaz [9]. ARS es otro ejemplo de simulador de código abierto genérico para robótica académica escrito en Python y se caracteriza por tener una documentación extensa [10]. ICUB es una plataforma de simulación cognitiva completa para un

robot humanoide que implementa la complejidad de la cinemática y provee una interface de control [11], [12].

En [13] se presenta el desarrollo de una aplicación móvil destinada al control de un brazo robot. La aplicación se elaboró mediante la herramienta de programación basada en bloques MIT App Inventor, la cual permite desarrollar aplicaciones para dispositivos móviles que funcionan bajo el sistema operativo Android. La interfaz gráfica de la aplicación es intuitiva y cuenta con tres modos de operación: manual, programación y automático. Tanto la aplicación móvil como el brazo robot tienen la finalidad de apoyar el aprendizaje de estudiantes que cursan la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Uno de los campos con buen desarrollo es la robótica educativa, la cual es un medio de aprendizaje para fortalecer áreas específicas del conocimiento y desarrollar competencias en el estudiante mediante la planeación, diseño, implementación, prueba y puesta en marcha de robots [14].

La robótica educativa es propicia para apoyar habilidades productivas, creativas, digitales y comunicativas; convirtiéndose en un motor para la innovación produciendo cambios en las personas, en las ideas y actitudes, modos de actuar y pensar de los estudiantes y educadores [14].

En este artículo se presenta el diseño e implementación de una interface virtual para la simulación y programación de robots de tres grados de libertad, buscando despertar el interés de los estudiantes y transformando las asignaturas tradicionales en más atractivas e integradoras mediante la creación de un entorno de aprendizaje que recrea los problemas del ambiente que los rodea.

## **2. Desarrollo**

El objetivo de este proyecto es desarrollar una plataforma de simulación y programación de robots con una interface amigable y que permita al usuario aprender de manera natural conceptos sobre robótica. Cuando se ejecuta la aplicación aparece una pantalla donde se visualiza una imagen de un robot de cadena cinemática abierta de tres grados de libertad así mismo se observa la estructura del programa y la lista de posiciones en la figura 1.

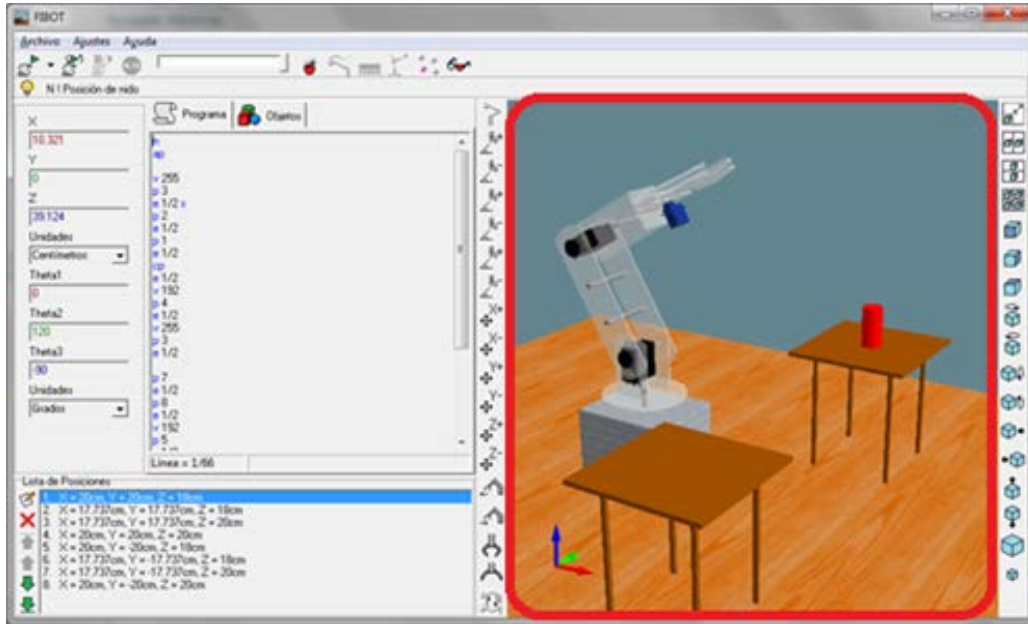


Figura 1 Interfaz principal del simulador.

La interface gráfica de usuario fue desarrollada en Borland C++ Builder 6, para tener acceso al panel del código seleccione la pestaña Programa, en este panel podrá redactar y editar el programa como en cualquier editor de texto plano. El programa está conformado por líneas de código, las cuales sólo puede contener un comando seguido de un comentario, el cual inicia con el carácter '!' y abarca hasta el final de la línea; es importante que la simulación no se encuentre en ejecución para poder editar el código. Se pueden agregar nuevos objetos seleccionando la pestaña Objetos, una vez realizado esto, en el panel de objetos se podrá elegir un objeto de la lista y su imagen aparecerá en el panel de vista previa, así como su orientación y propiedades de tamaño. Para ejecutar la simulación se presiona el botón de reproducir, en este modo se ejecutarán secuencialmente todos los comandos contenidos en el código del programa desde el primer comando hasta el último, posteriormente la ejecución del programa se detendrá automáticamente.

### Cinemática del robot

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Se interesa por la descripción analítica del movimiento

espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares [16]. A continuación, se desarrollan los modelos cinemático directo e inverso de un robot de tres grados de libertad que se implementarán en la interface visual.

### Modelo cinemático directo del robot

La configuración del robot que se va a utilizar en la herramienta computacional está compuesta por una cadena cinemática de tres eslabones rectos de longitudes  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$ , como se muestra en la figura 2 [17].

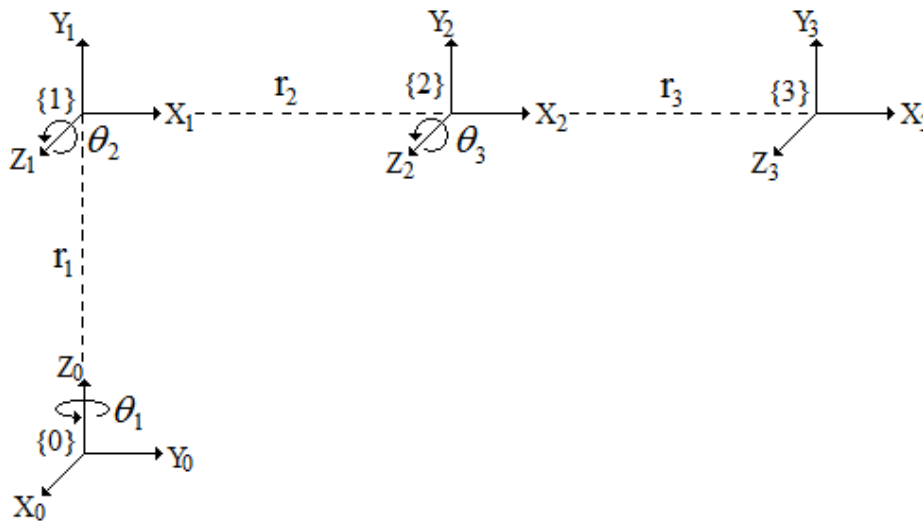


Figura 2 Cadena cinemática.

Los parámetros de Denavit-Hartenberg y rango de movimiento de cada unión se resumen en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros de Denavit-Hartenberg.

Eslabón	$\theta_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$a_i$	Rango
$r_1$	$\theta_1$	$90^\circ$	$r_1$	0	-90 a 90
$r_2$	$\theta_2$	0	0	$r_2$	0 a 180
$r_3$	$\theta_3$	0	0	$r_3$	-90 a 90

Las matrices de transformación que se obtienen con los parámetros de tabla 1 son ecuaciones 1, 2 y 3.

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & -c\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & r_2 c\theta_2 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & r_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & r_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & r_3 s\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

La matriz de transformación global  ${}^0A_3$  proveniente de la multiplicación de ecuaciones 1, 2 y 3, está dada por ecuación 4.

$${}^0A_3 = \begin{bmatrix} c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - c\theta_1 c\theta_3 s\theta_2 & s\theta_1 & r_2 c\theta_1 c\theta_2 + r_3 c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - r_3 c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 \\ c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1 - s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 & -c\theta_2 s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_3 s\theta_1 s\theta_2 & -c\theta_1 & r_2 c\theta_2 s\theta_1 + r_3 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1 - r_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 \\ c\theta_2 s\theta_3 + c\theta_3 s\theta_2 & c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_2 s\theta_3 & 0 & r_1 + r_2 s\theta_2 + r_3 c\theta_2 s\theta_3 + r_3 c\theta_3 s\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para obtener las ecuaciones de la cinemática directa aplicamos la matriz de transformación a ecuación 4 al origen, ecuación 5.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0A_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_2 c\theta_1 c\theta_2 + r_3 c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - r_3 c\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 \\ r_2 c\theta_2 s\theta_1 + r_3 c\theta_2 c\theta_3 s\theta_1 - r_3 s\theta_1 s\theta_2 s\theta_3 \\ r_1 + r_2 s\theta_2 + r_3 c\theta_2 s\theta_3 + r_3 c\theta_3 s\theta_2 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A partir de obtener las ecuaciones cinemáticas se procede a plantear el pseudocódigo para implementar la función que se utilizará en la herramienta computacional para calcular las posiciones del efector final del robot.



## Implementación de la cinemática directa

Las ecuaciones obtenidas del modelo cinemático directo se codificaron utilizando el lenguaje de programación C++ para calcular la cinemática directa (ecuaciones simplificadas). Dicho programa se presenta en la figura 3.

```
void ForwardKinematics(double theta1, double theta2, double
theta3, double r0, double r1, double r2, double* x, double* y,
double* z)
{
    double R = r2 * cos(theta2) + r3 * cos(theta2 + theta3);
        *x = R * cos(theta1);
        *y = R * sin(theta1);
        *z = r1 + r2 * sin(theta2) + r3 * sin(theta2 + theta3);
}
```

Figura 3 Función de implementación de la cinemática directa.

## Modelo cinemático inverso

Debido a la simplicidad del robot, cuyo esquema se muestra en figura 4, la cinemática inversa se calculará de manera analítica. El modelo obtenido a partir de este análisis servirá para implementar la función que calcule el valor de las variables articulares en la interfaz de simulación.

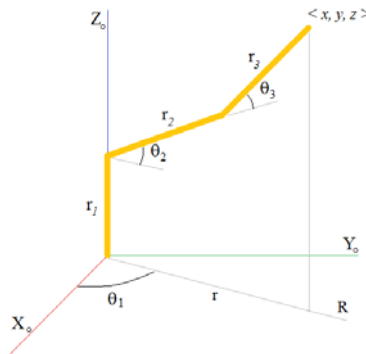


Figura 4 Esquema del robot de tres grados de libertad.

El ángulo  $\theta_1$  se obtiene mediante ecuación 6.

$$\theta_1 = \text{Atan2}(y, x) \quad (6)$$

Para el ángulo  $\theta_3$ , observando la figura 5 se tiene que, por teorema de Pitágoras, ecuación 7.

$$r^2 + (z - r_1)^2 = h^2 \quad (7)$$

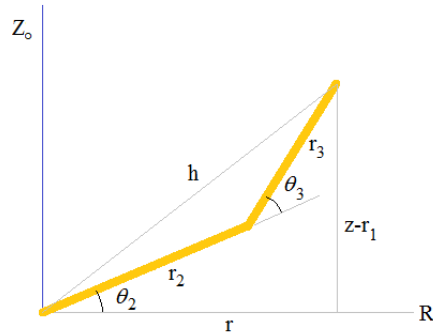


Figura 5 Esquema del robot seccionado.

Por otro lado, usando la ley de coseno se tiene ecuación 8.

$$r_2^2 + r_3^2 + 2r_2r_3 \cos \theta_3 = h^2 \quad (8)$$

Combinando las ecuaciones 7 y 8, se tendrán ecuaciones 9.

$$r^2 + (z - r_1)^2 = r_2^2 + r_3^2 + 2r_2r_3 \cos \theta_3$$

$$\cos \theta_3 = \frac{r^2 + (z - r_1)^2 - r_2^2 - r_3^2}{2r_2r_3}$$

$$\sin \theta_3 = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3} \quad (9)$$

Simplificando ecuaciones 9, se obtiene el ángulo  $\theta_3$ , ecuación 10.

$$\theta_3 = \text{Atan 2} \left( \sqrt{1 - \cos^2 \theta_3}, \cos \theta_3 \right) \quad (10)$$

Para el cálculo de  $\theta_2$  se utiliza la figura 6.

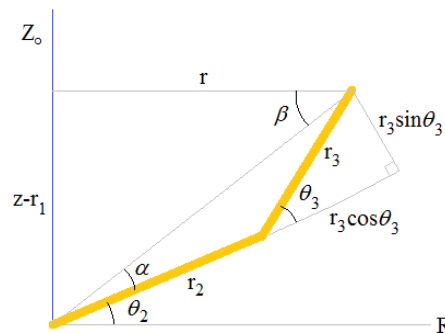


Figura 6 Esquema del robot seccionado con triángulos rectángulos.

Para calcular  $\theta_2$  se tiene:

$$\theta_2 = \beta - \alpha \quad (11)$$

En donde  $\beta$  se determina mediante ecuación 12.

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{z-r_1}{r}\right) = A \tan 2\left(\frac{z-r_1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) \quad \text{y} \quad \alpha = A \tan 2\left(\frac{r_3 \sin \theta_3}{r_2 + r_3 \cos \theta_3}\right) \quad (12)$$

Sustituyendo ecuación 12 en 13 obtenemos  $\theta_2$ , ecuación 13.

$$\theta_2 = A \tan 2\left(\frac{z-r_1}{\sqrt{x^2+y^2}}\right) - A \tan 2\left(\frac{r_3 \sin \theta_3}{r_2 + r_3 \cos \theta_3}\right) \quad (13)$$

### Implementación de la cinemática inversa

La codificación en C++ de la cinemática inversa se presenta en la figura 7 solamente para la primera solución.

```
void InverseKinematics(double x, double y, double z, double r1,
double r2, double r3, double* theta1, double* theta2, double*
theta3)
{
    *theta1 = atan2(y, x);
    double Q = (x*x + y*y + (z-r1)*(z-r1) - r2*r2 - r3*r3) / (2
    * r2 * r3);
    *theta3 = atan2(sqrt(1 - Q*Q), Q);
    *theta2 = atan2(z - r1, sqrt(x*x + y*y)) - atan2(r3 *
    sin(*theta3), r2 + r3 * cos(*theta3));
}
```

Figura 7 Función de implementación de la cinemática inversa.

Debido a la multiplicidad de soluciones para la cinemática inversa es necesario disponer de un criterio que nos permita obtener la mejor solución de entre las posibles, para ello se considerará como solución óptima la que requiera menor movimiento de los eslabones para alcanzar la posición deseada. Para llevar a cabo lo anterior se desarrolló el pseudocódigo mostrado en la figura 8.

```
Theta1, Theta2 y Theta3 son los ángulos actuales

Calcular Theta11, Theta12, Theta31, Theta32, Theta21, Theta22,
Theta23, Theta24

Si |Theta11 - Theta1| < |Theta12 - Theta1|
    Theta1 = Theta11
    Theta3 = Theta31;
    Si |Theta21 - Theta2| < |Theta22 - Theta2|
        Theta2 = Theta21
    En otro caso
        Theta2 = Theta22
    Fin Si
En otro caso
    Theta1 = Theta12
    Theta3 = Theta32;
    Si |Theta23 - Theta2| < |Theta24 - Theta2|
        Theta2 = Theta23
    En otro caso
        Theta2 = Theta24
    Fin Si
Fin Si
```

Figura 8 Pseudocódigo para encontrar la solución óptima para los ángulos del robot.

### 3. Resultados

La interfaz se diseñó y compiló utilizando el entorno de desarrollo integrado Borland C++ Builder 6 en forma de un software orientado a la simulación y programación mediante comunicación serial del brazo robot como se muestra en la figura 9.

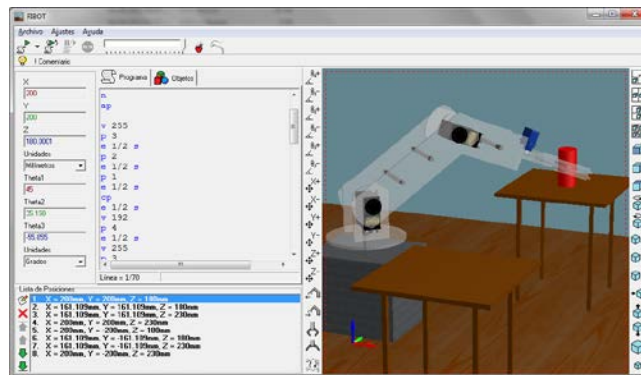


Figura 9 Pantalla principal de la interfaz de simulación y programación.

Dentro de la interfaz, el brazo se puede mover modificando de manera individual ya sean los ángulos de rotación de cada eslabón o las coordenadas de la pinza mediante unos botones que incrementan o decrementan en una cantidad predeterminada estos valores, de igual forma se puede modificar la velocidad que se realiza este movimiento y el estado y grado de apertura de la pinza.

La interfaz contiene unos cuadros con texto en donde pueden ingresarse los valores numéricos que se desea adquieran los ángulos de rotación o las coordenadas de la pinza para un control más preciso. Adicionalmente se pueden grabar puntos en una lista, los cuales se van almacenado en una lista para posteriormente ser referenciados en el programa o hacer que el brazo vaya a esa posición haciendo doble clic sobre el elemento en la lista.

Es posible dentro de la interfaz la programación mediante código de rutinas sencillas para que el brazo las ejecute, para ello se diseñó un lenguaje de programación del brazo orientado a tal efecto, en la figura 10 se presenta ejemplo de un programa con comentarios.

```
! Inicio de programa
N                               ! Ir a posición de inicio
AP                              ! Abrir pinza
CI 10 20 25 CM ABS             ! Cinemática inversa a x=10 y=20 z=25
E 1 S                           ! Esperar 1 s
CP                              ! Cerrar la pinza
P 1                             ! Ir al punto 1 en la lista
AP                              ! Abrir pinza
N                               ! Ir a posición de inicio
! Fin de programa
```

Figura 10 Fragmento de código para el movimiento del robot.

El editor de programa dentro de la interface tiene coloreado de sintaxis, como en el programa de ejemplo, los comentarios se colorean automáticamente en verde y las palabras clave en azul, además, al escribir un comando se muestra una referencia rápida de la sintaxis del comando lo cual agiliza la programación.

Una vez que el programa está escrito, si es que no existen errores de sintaxis, puede ejecutarse y simularse mediante un modelo en 3D con las mismas proporciones que el brazo robot; adicionalmente, es posible introducir primitivas en 3D dentro de la simulación, con las cuales puede interactuar la pinza del brazo robot, como se muestra en la figura 11.

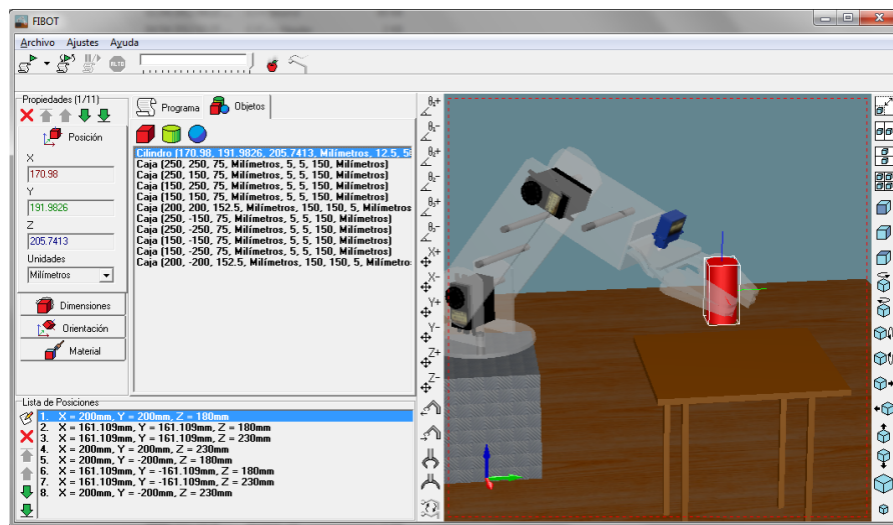


Figura 11 Vista previa del robot manipulando objetos.

Cabe mencionar que el programa, la lista de puntos y primitivas 3D, pueden guardarse en archivos que posteriormente pueden ser abiertos y editados en este mismo software; esto para no perder el trabajo cuando se cierre la aplicación, hay

que tener en consideración la medición de la distancia del objeto al robot y al momento de guardar los puntos de posición del brazo no mover los objetos o posicionarlos como estaban antes.

#### **4. Conclusiones**

Los programas comerciales de simulación robótica usualmente poseen una alta calidad y tecnologías avanzadas, pero al mismo tiempo incrementan de manera significativa el costo de desarrollo para los usuarios. Adicionalmente, muchos proveedores comerciales proporcionan solamente simuladores para sus propios productos, lo que resta versatilidad y flexibilidad en los desarrollos robóticos.

El software desarrollado permite aprender de manera fácil y rápida los principios y teorías de programación usadas comúnmente en los robots. Se diseñó e implementó un software para emular un ambiente robótico para educación que permite simular y programar un robot de manera virtual.

El software implementado permite el desarrollo de competencias básicas en el estudiante como trabajo en equipo, pensamiento sistemático, apertura, individualidad, identificación y solución de problemas, gestión de proyectos, y otras en la formación integral de un profesionista.

Como trabajo futuro es la adición de una biblioteca con robots de diferentes configuraciones, dispositivos de transferencia y objetos primitivos.

#### **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] K. Kimoto, S. Yuta, "Autonomous mobile robot simulator-a programming tool for sensor-based behaviour". *Autonomous Robots*. Vol. 1. Jun 1995. Pp. 131-148.
- [2] A. Liu, J. Newsom, C. Schunn, R. Shoop, "Students learn programming faster through robotic simulation". *Tech Directions*. Vol. 72. Mar. 2013. pp. 16-19.
- [3] O. Michel, "Cyberbotics ltd webots professional mobile robot simulation". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 1. 2004. Pp. 39-42.

- [4] E. Rohmer, S. P. N. Singh, M. Freeze, "V-REP: a versatile and scalable robot simulation framework". Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 13). Mar. 2013. Pp. 1321-1326.
- [5] Easy Rob 3D robot simulation tool. [http://www.easy-rob.com/easy\\_rob.html](http://www.easy-rob.com/easy_rob.html). Agosto 2016.
- [6] L. Xu, "Robotstudio: A modern IDE-based approach to reality computing". Proc. The 38th SIGCSE Technical Symposium on Computer Science Education (SIGCSE 07). Mar. 2007. Pp. 440-444.
- [7] J. Jackson, "Microsoft robotics studio: A technical introduction". IEEE Robotics and Automation Magazine. vol. 14. no. 4. Dec.2007. Pp. 82-87.
- [8] G. Echeverria, N. Lassabe, A. Degroote, and S. Lemaignan, "Modular open robots simulation engine: MORSE". Proc. Int. Conf. Robot. And Automation (ICRA 11). 2011. Pp. 46-51.
- [9] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, R. Weeler, A. Y. Ng, "ROS: An open-source robot operating system," Proc. ICRA Workshop Open Source Software, 2009, Pp. 1-6.
- [10] ARS: Phyton robotics simulation. <https://ars-project.readthedocs.io/en/latest/index.html>. Agosto 2016.
- [11] N. G. Tsagarakis, B. Vanderborght, M. Laffranchi, D. G. Caldwell, "The mechanical design of the new lower body for the child humanoid robot 'iCub'". Proc. Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 09). Oct. 2009. Pp. 4962-4968.
- [12] V. Tikhandoff, A. Cangelosi, P. Fitzpatrick, G. Metta, L. Natale, F. Nori, "An open-source simulator for cognitive robotics research: the prototype of the iCub humanoid robot simulator". Proc. 8th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS '08). 2008. Pp. 57 -61.
- [13] J. Medina Cervantes, N. Castro Gutiérrez, E. Mejía Sánchez, R. Villafuerte Díaz, "Aplicación móvil para el control de un brazo robot". Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa. Volumen 4. Núm. 1. Junio 2016. Pps.21-43.

- [14] N. García Hurtado, L. Castillo García, A. Escobar Jiménez, “Plataforma educativa ROBI”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Volumen 1. Número 19, 2012
- [15] F. Bravo Sánchez, A. Forero Guzmán, “La robótica como un recurso para facilitar el aprendizaje y desarrollo de competencias generales”. *Teoría de la Educación, Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*. vol. 13. núm. 2. 2012. pp. 120-136.
- [16] J. Craig, *Introducción a la Robótica*. 3a Edición. 2006. Ed. Pearson.
- [17] M. Spong, S. Hutchinson, M. Vidyasagar, *Robot Modelling and Control*. 2005. Ed. John Wiley & Sons.

## **6. Autores**

M.C. Braulio Cruz Jiménez obtuvo su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Automatización por el Tecnológico de Monterrey, su área de investigación son los sistemas de control y procesamiento de señales.

M.C. Jannette Contreras Rivero obtuvo su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Sistemas Ambientales por el Tecnológico de Monterrey, su área de investigación es matemáticas aplicadas.

M.I. Ricardo Peón Escalante obtuvo su grado de Maestro en Ingeniería Mecánica especialidad en diseño mecánico por la Universidad Nacional Autónoma de México y su área de investigación es síntesis óptima de sistemas mecánicos.

Dr. Luis Ricalde Catellanos obtuvo su grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Guadalajara, su área de investigación son los sistemas de control utilizando redes neuronales.



# MANIPULACIÓN DE UN DISPOSITIVO HÁPTICO A DISTANCIA

***Jorge Gudiño Lau***

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima

*jglau@ucol.mx*

***Felipe de Jesús Ríos Cortes***

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima

*frcortez@ucol.mx*

***Miguel Duran Fonseca***

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima

*mduran@ucol.mx*

***Saida Miriam Charre Ibarra***

Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima

*scharre@ucol.mx*

## **Resumen**

Este artículo describe un sistema de teleoperación formado por dos dispositivos hápticos, que son manipulados por un control no lineal proporcional derivativo con compensador de gravedad (PD+g). También aborda de forma detallada la configuración de la red LAN para la comunicación entre los dispositivos. La programación se desarrolló en Matlab, tanto para la comunicación como el control. Además, los resultados experimentales de la teleoperación son mostrados en este artículo, para demostrar que la comunicación funciona correctamente, así como el control.

**Palabra(s) Clave(s):** Control no lineal, dispositivo háptico, robots manipuladores, Teleoperación.

## 1. Introducción

Un sistema de teleoperación por lo general consiste de dos robot manipuladores que están conectados de tal manera que se permite que el operador humano manipule uno directamente, que se llama maestro, al generar señales que se asignan a la distancia al manipulador, al cual se le llama esclavo. [1]

La figura 1 muestra el esquema general de un sistema de teleoperación. Se entiende por teleoperación el caso en el que un operador humano, remotamente ubicado respecto al robot, lo manipula. Esta teleoperación resulta incompatible con una autonomía robótica, entendida como el caso en que el control y toma de decisiones se realizan por el robot mismo [2].

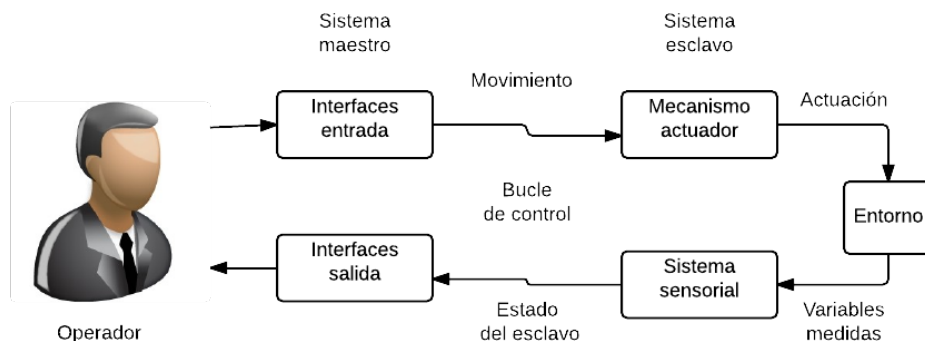


Figura 1 Esquema general de un sistema de teleoperación.

Los robots móviles teleoperados son ampliamente utilizados para llevar a cabo tareas complejas en ambientes peligrosos: algunos ejemplos conocidos son la inspección de estructuras subacuáticas, limpieza de plantas nucleares, o la remoción de minas. [3]

El diseño de la interfaz hombre-máquina suele ser crítico. Por lo cual normalmente rehace en el operador las tareas de toma de decisiones con base a la información sensorial, experiencia y habilidad. [4]

En 1947 nacen las primeras investigaciones referentes a teleoperación. En 1948 se obtuvo el desarrollo del primer manipulador teleoperado mecánico, denominado M1. Ambos manipuladores eran prácticamente iguales, como se muestra en la figura 2 [5].

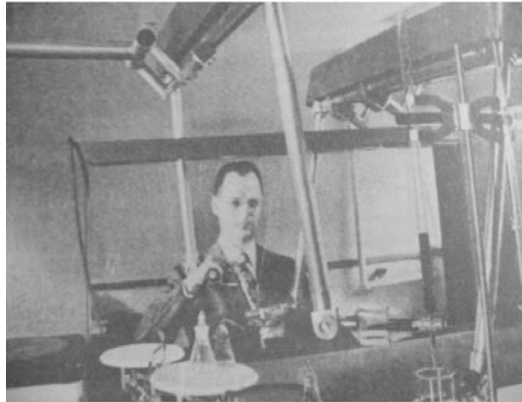


Figura 2 Primer telemanipulador maestro-esclavo mecánico.

En los años 50 se obtuvieron las primeras investigaciones dirigidas a motorizar ambos manipuladores, maestro y esclavo. En 1954 Goertz presenta el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores conocido como E1, tal como se observa en la figura 3 [5].

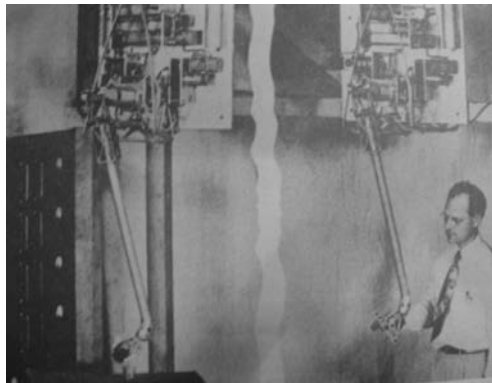


Figura 3 Primer telemanipulador maestro-esclavo eléctrico.

En los años sesenta se presentan las primeras investigaciones en el campo de las aplicaciones submarinas. A finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación alcanza su mayor auge con la utilización de aplicaciones espaciales [6].

Actualmente se han tenido avances importantes en la aplicación de las tecnologías de la teleoperación al sector médico [7]. Desde los primeros desarrollos de prótesis o dispositivos de asistencia a discapacitados hasta la más

novedosa de la telecirugía, o el telediagnóstico, aunque este no pertenezca estrictamente al sector de la teleoperación.

El trabajo de Fung [9], con una teleoperación con control bilateral. La técnica remota consiste en un Robot PUMA 560 montado sobre un robot móvil Nomadic XR4000, Wireless LAN, un ordenador y una cámara de video; y la técnica local es una GUI que da realimentación visual al usuario, el usuario manipula el robot mediante un joystick con realimentación de fuerza.

El trabajo de Alvarado [10], “Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado”, presenta el diseño de un sistema robótico que permite la retroalimentación háptica de un brazo manipulador teleoperado.

## 2. Desarrollo

El sistema de teleoperación utilizado en este trabajo consta de dos dispositivos hápticos Omni Phantom, uno se denomina maestro y otro como esclavo. El Omni maestro envía su posición angular, a través de internet bajo el protocolo TCP/IP desde la computadora cliente, y el Omni esclavo la recibe desde la computadora servidor y la reproduce. La conexión, envío y recibo de datos vía internet se llevó a cabo en Matlab y Simulink. En la figura 4 se puede observar el sistema de teleoperación.

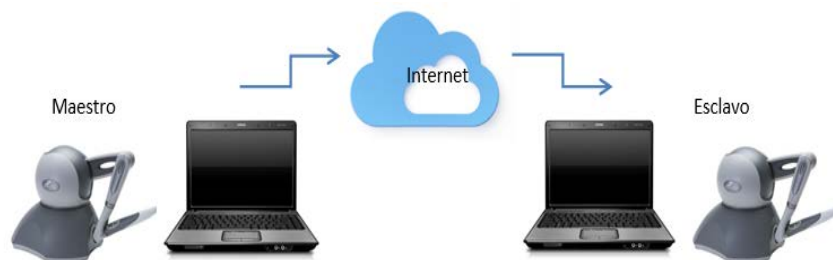


Figura 4 Sistema de teleoperación.

### Descripción del dispositivo háptico Omni Phantom

El dispositivo que se utiliza en esta investigación pertenece a los dispositivos hápticos Geomagic ®. Los dispositivos omni phantom (figura 5) mide de forma precisa la posición espacial 3D (a lo largo de los ejes x, y y z) y la orientación

(inclinación, giro y dirección) del lápiz de mano. Los dispositivos utilizan motores para crear las fuerzas de retorno en la mano del usuario para simular el tacto y la interacción con objetos virtuales. [8] El omni phantom consta con 6 grados de libertad, de los cuales solo 3 de ellos son actuados, es decir, son los que se pueden controlar mediante un algoritmo, mientras que los otros 3 son subactuados.



Figura 5 Phantom Omni.

## Software

Para este trabajo de investigación se necesita tener instalado lo siguiente:

- Sistema operativo windows7 o versiones más actuales a esta.
- Matlab 2014 o versiones más actualizadas, siempre y cuando sean para 32 bits.
- Visual Studio.
- Driver del adaptador USB del cable de red del Omni (Driver\_USB ).
- Controladores del Omni: -Geomagic\_Touch\_Device\_Driver\_2014
- OpenHaptics\_Academic\_3.1.
- Librería “Haptik library” (puede descargarse en la página web.[www.haptiklibrary.org](http://www.haptiklibrary.org))

## Comunicación

Para la comunicación en la teleoperación se utiliza el protocolo TCP/IP. Los estándares del protocolo TCP/IP son abiertos y ampliamente soportados por todo tipo de sistemas, es decir, se puede disponer libremente de ellos y son desarrollados independientemente del hardware de los ordenadores o de los sistemas operativos.

Para llevar a cabo la teleoperación se utilizan dos computadoras, una que cumpliera con el rol de cliente y otra como servidor. Para ello se crearon en el entorno de Matlab los programas que establecen la conexión TCP/IP, el envío y recibo de datos (posición del Omni Phantom).

## **Conexión**

En los programas para establecer la conexión entre cliente y servidor, se utilizaron las funciones `tcpip( )` y `fopen( )`:

- **Tcpip( )**. Esta función crea un objeto TCPIP y además se declara:
  - ✓ La IP de la computadora remota
  - ✓ El puerto remoto
  - ✓ “NetworkRole”, que activa el soporte para sockets de servidor, usando dos valores, “client” o “server” para establecer una conexión como cliente o servidor.
- **Fopen()**. Esta función conecta el objeto TCPIP al host.

## **Servidor**

Para el programa del servidor se utiliza la función `tcpip( )` configurándose de la siguiente manera:

```
conexión02=tcpip('148.213.117.20', 4013,'NetworkRole','server');
```

De esta forma, se crea un objeto TCPIP, `conexión02` (declarado como variable global), como una interfaz de servidor para poder establecer un medio para la comunicación, específicamente esta función habilita el puerto 4013 de la dirección IP ‘148.213.117.20’ y también asigna el “server” para establecer la conexión como servidor.

Para conectar el objeto “conexión02” con el cliente con IP ‘148.213.117.20’ establecido en la función `tcpip( )`, se utilizó la función `fopen( )` de la siguiente manera:

```
% Configuración y conexión  
disp('Receiver started');
```

```
conexion02=tcPIP('148.213.117.21', 4013,'NetworkRole','server');  
% Espera la conexión  
disp('Waiting for connection');  
fopen(conexion02);  
disp('Connection OK');
```

## Ciente

Para el programa del cliente se utiliza la función `tcPIP( )` configurándose de la siguiente manera:

```
conexión = tcPIP('148.213.117.21',4013);
```

Esta instrucción crea un objeto TCPIP, `conexión` (declarado como variable global), como una interfaz de cliente, específicamente esta función habilita el puerto 4013 de la dirección IP '148.213.117.21'. Para conectar el objeto "conexión" con el servidor con IP '148.213.117.21' establecido en la función `tcPIP( )`, se utiliza la función `fopen( )` como:

```
% Configuración y conexión  
conexion = tcPIP('148.213.117.21',4013);  
% Apertura del socket y envío de información  
fopen(conexion);  
disp('Connection OK');
```

## Lectura y escritura de posición del dispositivo háptico

La lectura y escritura de posición del Omni Phantom se llevó a cabo con la ayuda de la librería Haptik Library. Esta librería proporciona las posiciones del Omni o permite que estas se puedan manipular, para que el omni Phantom se dirija a la posición que se desee. En la figura 6 muestra la lectura de posición angular en simulink del programa "Envío" y la figura 7 muestra la escritura del programa "Recibo", en ambos casos se utiliza el bloque `haptik_simulink` (de la librería Haptik).

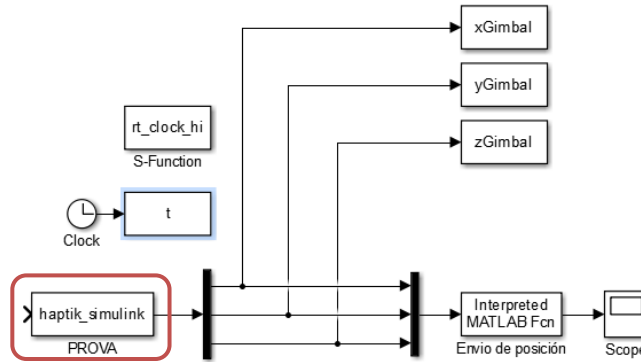


Figura 6 Lectura de posición, programa Envío.

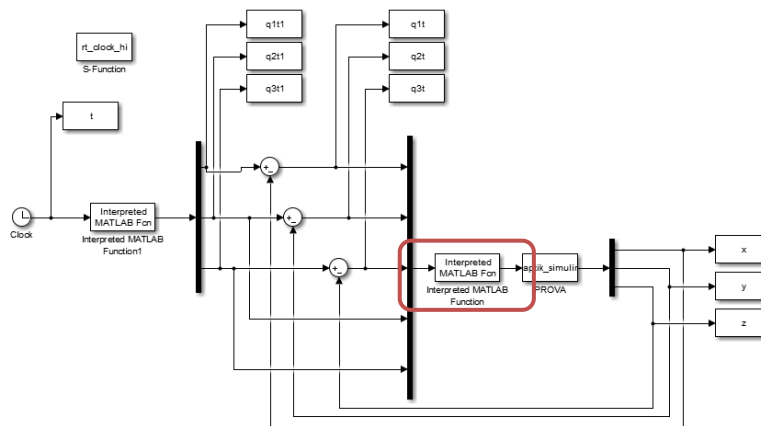


Figura 7 Escritura de posición, programa Recibo.

## Envío y recibo de datos

Para el envío y recibo de posiciones (datos), se crean dos programas en simulink. El programa para el envío se ejecuta desde la computadora cliente y el que recibe datos desde el servidor. Los dos llaman a través del bloque “Interpreted MATLAB function” a su respectiva función de envío o recibo de datos.

## Envío de datos

La figura 8 muestra el programa que realiza el envío de posición del dispositivo háptico, se observa que el bloque “Interpreted MATLAB function”, recibe los datos de posición desde el bloque “haptik\_simulink”, los cuales se envían con la función “envios02”.



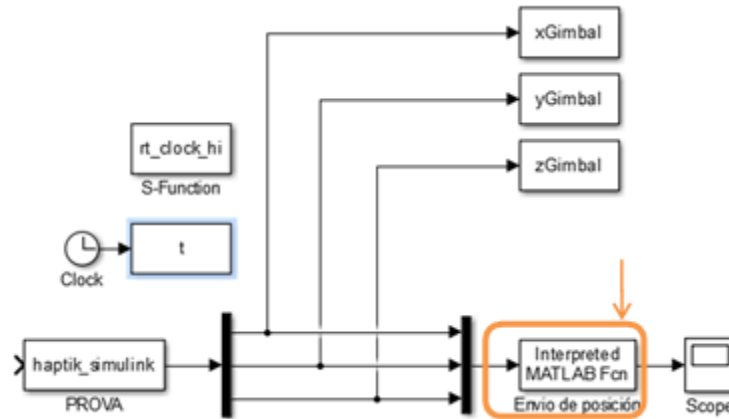


Figura 8 Envío de datos.

### Función envios02

Se programa una función llamada envios02 que es ejecutada por el bloque “Interpreted MATLAB function”. Ésta realiza el envío de posiciones de la siguiente manera:

- Recibe la posición del Omni proporcionada por el bloque haptik\_simulink
- Verifica si es la primera vez que se envíaran los datos
- Si es así, envía la posición al servidor.
- Si no, evalúa si hubo un cambio de posición.
  - ✓ Si hubo cambios, envía la nueva posición.
  - ✓ Si no, mantiene la misma posición.

Para el envío de posición se utiliza la función de Matlab fwrite( ), la cual escribe los datos en el objeto tcpip, de la siguiente manera.

```
fwrite(conexión,tt,'double');
```

Siendo **conexión**: el objeto tcpip al que se escriben los datos,

**tt**: el vector de posición ,

**double**: el tipo de dato con el que se envía el valor tt.

### Recibo de datos

La figura 9 muestra el programa que realiza el recibo de datos de posición. El bloque “Recibo de posición”, con la función y “recibidos02”, recibe datos de

posición, y estos se escriben al dispositivo háptico a través del controlador y el bloque `haptik_simulink`.

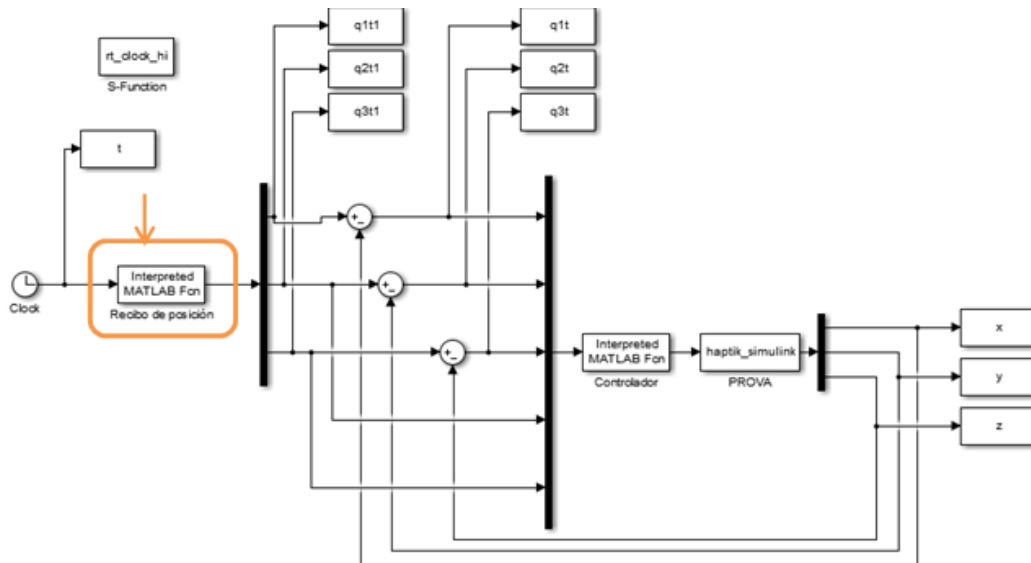


Figura 9 Recibo de datos.

**Función recibidos02.** La función recibidos02 es ejecutada por el bloque “Recibo de posición”. Esta recibe las posiciones con la función `fread( )`, de la siguiente manera:

$$Info = fread(conexión02, [3 1], 'double')$$

Siendo **conexión02**: el objeto `tcpip` desde donde se leen los datos:

- **[3 1]**: tamaño del vector de datos que recibe,
- **double**: el tipo de datos del vector que recibe.

Asignándose el valor de la función `fread( )` a la variable `info`.

### Control del sistema de teleoperación

De las ecuaciones de movimiento del omni phantom, el modelo dinámico del robot contiene no linealidades que se deben principalmente a las fuerzas de fricción, coriolis, gravedad y fuerzas centrífugas, por lo que no es posible aplicar directamente las técnicas de control clásico, por lo tanto se aplica un control PD

con compensador de gravedad, que contrarresten las no linealidades que aparecen en el modelo dinámico, en este caso el vector de gravedad, se aplica este controlador ya que es uno de los más sencillos y además garantiza el control de los movimientos del robot para que siga una trayectoria determinada por el omni maestro.

Para mover el omni Phantom esclavo a la posición deseada  $q_{1t1}$ ,  $q_{2t1}$  y  $q_{3t1}$ , enviados por el omni maestro, se utiliza un controlador PID con compensador de gravedad. En la figura 10 muestra el programa "Recibo" con el bloque Controlador. En el esquema se observa que la posición recibida por el omni maestro ( $q_{1t1}$ ,  $q_{2t1}$ ,  $q_{3t1}$ ) es el set point del controlador; se hace una diferencia la posición actual ( $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ ), que es leída por el bloque `haptik_simulink`, para obtener el error de posición, este entra al controlador el cual corrige la posición hasta disminuir el error a cero.

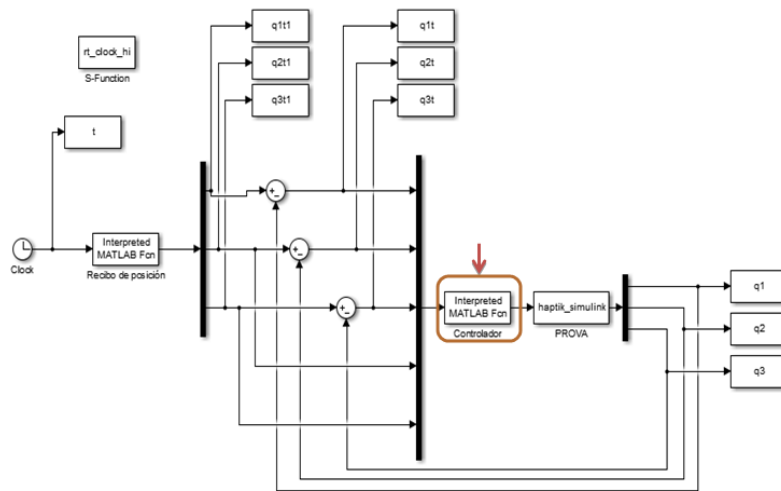


Figura 10 Control PD+G.

### 3. Resultados experimentales

#### Descripción del equipo experimental

El equipo experimental consiste en un manipulador Omni Phantom (dispositivo háptico) en arquitectura abierta, es decir puede implementarse cualquier algoritmo de control a este dispositivo háptico. También dos computadoras con Windows 7

instalado; con software especializado como visual studio 2008 C++, Matlab R2014a, tal como se muestra en la figura 11.



Figura 11 Equipo experimental.

### Resultados experimentales

Los resultados experimentales de la teleoperación, realizando trayectorias de forma manual y aleatoria con el Omni maestro, cada uno con diferente duración (en un tiempo de 15 a 35 segundos), las cuales fueron enviadas a través de internet siendo recibidas y repetidas por el Omni esclavo. De esta forma se obtuvieron las gráficas de error de posición y de la posición deseada (enviada por el Omni maestro) contra la posición real realizada por el esclavo.

La figura 12 muestra las gráficas del primer, segundo y tercer eslabón respectivamente (de arriba hacia abajo) del primer experimento.

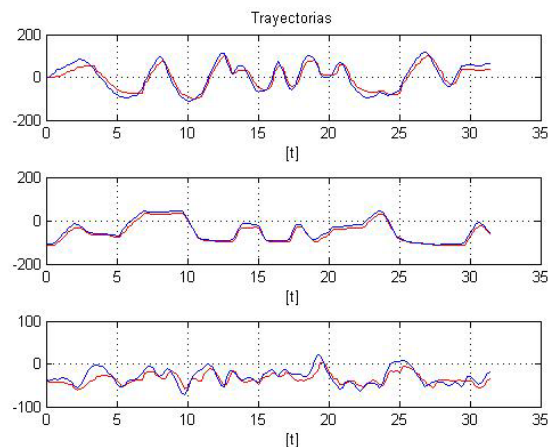


Figura 12 Trayectoria deseada vs real del primer experimento.

Se muestra en color azul el set point, que es la trayectoria enviada por el Omni maestro y en color rojo la trayectoria realizada por el Omni esclavo (para cada eslabón). Como se puede observar, se obtuvieron buenos resultados ya que hay una diferencia muy pequeña entre las trayectorias deseadas y las reales. Esto se puede ver en la gráfica siguiente, donde se muestra el error de ésta trayectoria.

El segundo experimento es similar al primero, pero los movimientos son más lentos tal como se muestra en la figura 13, muestra las gráficas del primer, segundo y tercer eslabón respectivamente (de arriba hacia abajo) del primer experimento.

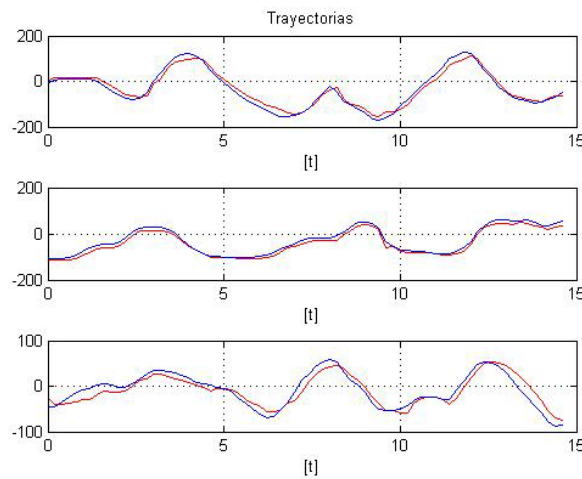


Figura 13 Trayectoria deseada vs real del segundo experimento.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se logró construir un sistema de teleoperación con dos dispositivos hápticos Omni Phantom utilizando las herramientas de Matlab, Simulink y la librería Haptik.

La comunicación se consiguió bajo el protocolo TCP/IP con ayuda de los objetos TCPIP de Matlab y con las funciones `fwrite()` y `fread()`, que permiten la escritura y lectura de datos (posiciones o trayectorias) vía internet de manera eficiente.

Para seguir la trayectoria y minimizar los problemas que causan los retardos en la comunicación se implementa un controlador PD con compensador de gravedad teniendo un resultado satisfactorio en el seguimiento de trayectorias por parte del Omni esclavo

Este trabajo de investigación queda como base para futuros trabajos de teleoperación en los que se aplique controladores no lineales más complejos que incluyan parte del modelo matemático de los dispositivos hápticos, complementándolo por ejemplo con entornos virtuales o llevándolo a una aplicación en específico como lo es el diagnóstico de deficiencias motrices, entrenamiento de cirugías a distancia, etc.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] C. Jianhong, S. Tosunoglu, C. Moore and D. Repperger, "A review of teleoperation system control". Florida Conference on Recent Advances in Robotics (FCRAR). May 2003.
- [2] D. Alvarado Juárez, M. A. Butrón Castañeda, D. Díaz Loyo y L. C. González García, "Teleoperación Háptica de Brazo Manipulador". Congreso científico tecnológico de IME. 2013. Pp. 1-6.
- [3] E. Nuño Ortega and L. Basañez Villaluenga, Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente. 2004. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España. Pp 1-15.
- [4] A. Ayala, L. García. G. Reyna, Desarrollo de un Sistema Robótico Háptico para Aplicaciones Biomédicas. 2008. Instituto Politécnico Nacional. CDMX. Pp 1-85.
- [5] J. Vertut, P. Coiffet, Les Robots; Téléopération, évolution des technologies. 1985th Edition. 1985. París: Editions Hermes. Francia.
- [6] T. B. Sheridan, "Space Teleoperation through Time Delay. Review and Prognosis". IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 9. Issue 5. Oct 1993. Pages: 592-606.
- [7] P. Dario, A. Menciassi, "Robotics for Surgery". 24<sup>th</sup> Annual Conference and the Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society EMBS/BMES Conference. 2002.
- [8] M. Ghodoussi, S. Butner, W. Yulun, "Robotic Surgery - the Transatlantic Case". ICRA '02. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 2 August 2002.

- [9] W. K. Fung, N. Xi, W. T. Lo, Y. H. Liu, "Adaptive real-time Internet-based teleoperation systems for efficiency improvement using network QoS". IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. July 2003.
- [10] D. A. Alvarado Juárez, M. A. Butrón Castañeda, D. Diaz Loyo, L. C. González García, "Diseño de Brazo Manipulador Háptico Teleoperado. La Mecatrónica en México". Vol. 2. Núm. 2. 2013. Pp. 67-76.

## **6. Autores**

Jorge Gudiño Lau es Doctor en Ingeniería Eléctrica en el área de control con especialidad en Robótica por la Universidad Nacional Autónoma de México en el 2005. Actualmente es Profesor-Investigador de Tiempo Completo y Líder del Cuerpo Académico UCOL-CA 21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

Felipe de Jesús Ríos Cortes es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Universidad de Colima. Actualmente es catedrático de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima. Cursa los estudios de posgrado en la Maestría en Ingeniería en la misma facultad.

Dr. Miguel Ángel Duran Fonseca Doctor en Ingeniería Eléctrica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico CENIDET en el 2010. Actualmente es Profesor-Investigador de Tiempo Completo, Coordinador Académico e integrante del Cuerpo Académico UCOL-CA 21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

M.I Saida Miriam Charre Ibarra es Maestra en Ingeniería en el área de automatización y control por el Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán en el 2004. Actualmente es Profesor-Investigador de Tiempo Completo y pertenece al Cuerpo Académico UCOL-CA 21 Sistemas Mecatrónicos y Eléctricos de la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima.

# CONTROL EN LAZO ABIERTO DE UN SISTEMA DE LEVITACIÓN MAGNÉTICA MEDIANTE UN INVERSOR Y UNA TARJETA ARDUINO

***Hiram Alberto Canseco García***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*hiramcanseco@gmail.com\*](mailto:hiramcanseco@gmail.com)

***Felipe González Montañez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*felipegonzalezmon@gmail.com\*](mailto:felipegonzalezmon@gmail.com)

***José Jiménez González***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*joseph31.ja@gmail.com\*](mailto:joseph31.ja@gmail.com)

***Ricardo Guadalupe Torres Carmona***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*trichy806@gmail.com\*](mailto:trichy806@gmail.com)

***José Luis Hernández Ávila***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*joeluish@gmail.com\*](mailto:joeluish@gmail.com)

***Eduardo Campero Littlewood***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

[\*ecl@correo.azc.uam.mx\*](mailto:ecl@correo.azc.uam.mx)

## **Resumen**

En este trabajo se presenta el control en lazo abierto del sistema de levitación magnética: anillo de Thomson. El control de la posición se realiza utilizando una plataforma experimental compuesta por un inversor de voltaje y una tarjeta Arduino De. El inversor se alimenta con un voltaje de 100 V de CD y mediante la tarjeta Arduino Due se controla el valor eficaz del voltaje en sus terminales de



salida. Por otro lado, la medición de la posición se lleva a cabo utilizando dos sensores ultrasónicos compatibles con las tarjetas Arduino. Adicionalmente, se detallan las conexiones realizadas entre los diferentes dispositivos electrónicos y se explican brevemente los códigos computacionales implementados. Finalmente, se presentan los resultados experimentales que muestran el control en lazo abierto de la posición del anillo de Thomson.

**Palabra(s) Clave(s):** Anillo de Thomson, Arduino, control, inversor trifásico.

## 1. Introducción

Los sistemas de levitación magnética (MagLev por su abreviatura en inglés) son utilizados en diferentes aplicaciones, como son: interruptores de potencia (usado como actuador), eliminación de arcos eléctricos y en levitación de materiales superconductores [1, 2]. Por ello, desde hace algunas décadas se ha buscado por diferentes métodos modelar y controlar estos sistemas de manera eficiente para las aplicaciones en que se requiera.

El anillo de Thomson es un sistema MagLev que consiste en una bobina de cobre devanada en un núcleo ferromagnético y un anillo de aluminio que rodea el núcleo. La bobina del sistema es alimentada por un voltaje sinusoidal, lo que asegura que el anillo esté en una posición de levitación estacionaria [3].

En este trabajo el control de posición del anillo se realiza mediante el control de voltaje en las terminales de su bobina, las cuales se conectan al devanado secundario de un transformador elevador. El devanado primario del transformador se alimenta por un inversor trifásico que a su vez es controlado por una tarjeta Arduino Due. Por otro lado, para medir la posición se utilizan un par de sensores ultrasónicos que son compatibles con las tarjetas Arduino.

En la actualidad, las placas de interfaz Arduino son una herramienta muy poderosa en la elaboración de proyectos debido a que son económicas, versátiles, reutilizables, fáciles de usar y de adquirir en el mercado. Estas tarjetas permiten realizar de manera sencilla la adquisición de datos, la generación de pulsos PWM, el control de motores, entre otras aplicaciones [4, 5].

El objetivo de este trabajo es realizar un control en lazo abierto del anillo de Thomson con una plataforma experimental que cuenta con diferentes dispositivos tecnológicos. Además, se busca proporcionar las herramientas necesarias para la implementación de esta plataforma con fines de docencia y de investigación que no necesariamente estén relacionados con el anillo de Thomson, por ejemplo, el control de motores de inducción.

## 2. Descripción del anillo de Thomson

El anillo de Thomson usado en este trabajo se muestra en la figura 1 y consiste en una bobina de alambre magneto calibre 18 AWG [1) Anillo, 2) Bobina del anillo, 3) Sensor de posición 1 y 4) Sensor de posición 2], devanado en un núcleo ferromagnético. El anillo, que es el dispositivo móvil de levitación magnética, está hecho de aluminio y tiene un diámetro ligeramente mayor que el núcleo ferromagnético, de manera que lo pueda rodear. En la base de la bobina se colocaron sensores ultrasónicos de posición para medir la elevación del anillo. En esta figura también se muestra un esquema que ilustra los parámetros geométricos del anillo considerados en su análisis. Estos, junto con los parámetros eléctricos del anillo se presentan en la tabla 1.

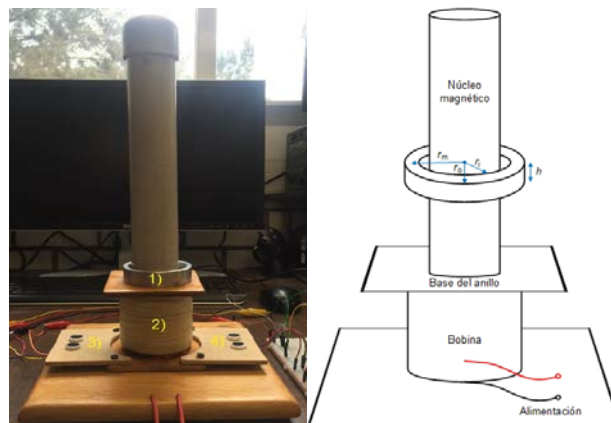


Figura 1 Anillo de Thomson.

Los parámetros  $R_1$  y  $L_1$  se obtuvieron experimentalmente realizando mediciones de potencia activa y potencia reactiva en la bobina. La resistencia del anillo  $R_2$  se

obtuvo mediante la resistividad conocida del aluminio  $\rho = 2.857 \times 10^{-8} \text{ } [\Omega \cdot \text{m}]$  y los parámetros geométricos del anillo con ecuación 1 [6, 7].

$$R_2 = \frac{\rho L_m}{A} \quad (1)$$

Tabla 1 Parámetros geométricos y eléctricos del anillo de Thomson.

Parámetro	Valor
Resistencia de la bobina $R_1$ [ $\Omega$ ]	80
Inductancia propia de la bobina $L_1$ [mH]	1.2103
Resistencia del anillo $R_2$ [ $\mu\Omega$ ]	6.118
Inductancia propia del anillo $L_2$ [pH]	141.02
Masa del anillo $m$ [kg]	0.081
Constante de amortiguamiento $\beta$ [N·s/m]	0.3
Número de vueltas de la bobina $N$	1140
Calibre del alambre AWG	18
Radio interno del anillo $r_i$ [m]	0.0310 m
Radio externo del anillo $r_o$ [m]	0.0365 m
Radio medio del anillo $r_m$ [m]	0.03375 m
Altura del anillo $h$ [m]	0.0180 m
Longitud (circunferencia) media del anillo $L_m$ [m]	0.2120 m
Sección transversal del anillo $A$ [m <sup>2</sup> ]	0.000099 m <sup>2</sup>

Donde  $L_m$  es la longitud o circunferencia media del anillo y  $A$  el área de sección transversal. Es importante mencionar que se despreció el efecto cortical debido a que los experimentos se realizaron con una frecuencia de 60 Hz. La inductancia  $L_2$  se obtuvo con la ecuación para un toroide [6, 7], ecuación 2.

$$L_2 = \mu_0 N^2 \left( r_m - \sqrt{r_m^2 - a^2} \right) \quad (2)$$

Donde  $r_m$  el radio medio del anillo y  $a$  el radio de sección transversal de un toroide cuya sección transversal es igual a la del anillo. En este caso,  $N$  es igual a 1.

### 3. Plataforma experimental

En esta sección se describe la plataforma experimental que se utilizó. La plataforma, además del anillo de Thomson, está conformada por los siguientes elementos:

- Fuente de alimentación: se utilizó para proporcionar un voltaje de CD al inversor trifásico.

- Inversor trifásico: se utilizó un inversor de 2 kW para control de motores modelo STEVAL-IHM028V1 para obtener voltajes alternos cuyos valores eficaces se controlaron a través de una tarjeta Arduino Due.
- Tarjeta Arduino Due: se utilizó como controlador del inversor. Está tarjeta se programó para modificar el valor eficaz de los voltajes en las terminales de salida del inversor.
- Sensores de posición: se utilizaron 2 sensores ultrasónicos HC-SR04 para la medición de la posición del anillo de Thomson.
- Tarjeta Arduino Mega 2560: se programó para poner en funcionamiento los sensores ultrasónicos, los cuales realizaron la medición de la posición del anillo. Las mediciones se obtuvieron a través de ésta tarjeta y el almacenamiento de la información se realizó utilizando MATLAB®.
- Transformador eléctrico de 500 VA, 110 V / 440 V: se utilizó para incrementar la magnitud de los voltajes a la salida del inversor y tener los niveles de voltaje que se requieren para el control de la posición del anillo. La frecuencia nominal del transformador es de 60 Hz, razón por la cual los experimentos se realizaron a ésta frecuencia.

En la figura 2 se muestra el esquema de conexión de los elementos que conforman la plataforma experimental. El inversor trifásico se alimentó con 100 V de CD provenientes de la fuente de alimentación, los cuales se mantuvieron fijos durante las pruebas. La forma de onda deseada en las terminales de salida del inversor es generada por su bloque de control. El bloque de control de la señal PWM es producido por la tarjeta Arduino Due. Los voltajes eficaces se modificaron mediante la lectura de un canal analógico de la tarjeta cuyo voltaje de entrada se varió con un potenciómetro.

Es importante mencionar que el rango de los voltajes eficaces en las terminales del inversor está limitado por el voltaje de alimentación. En este trabajo el voltaje de alimentación fue de 100 V de CD y se utilizaron 2 terminales a la salida del inversor (A y B). El voltaje eficaz en las terminales A y B puede variar aproximadamente entre 45 y 75 V. La elección del voltaje de alimentación se hizo

deliberadamente para trabajar en el rango de voltajes antes mencionado y que al utilizar un transformador elevador 1:4 se puedan obtener niveles de voltaje entre 180 y 300 V, que como se verá más adelante, es el intervalo que se requiere para realizar el control de anillo propuesto.

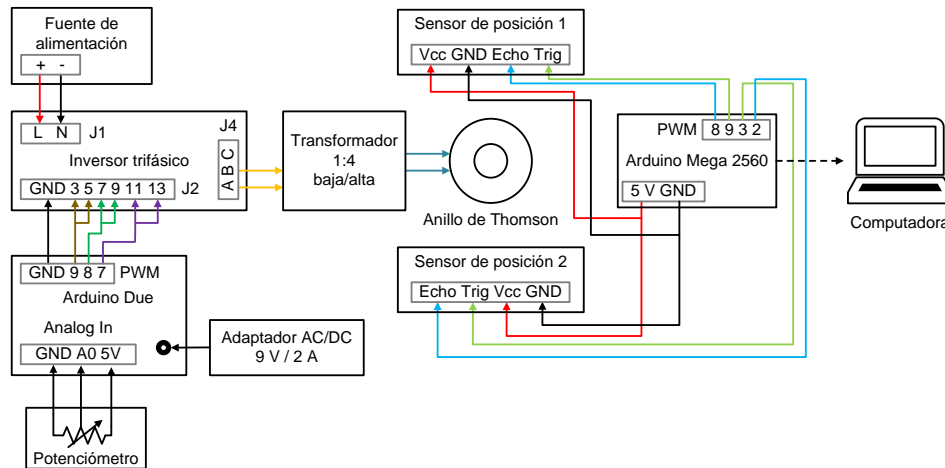


Figura 2 Esquema básico de conexión de la plataforma experimental.

La medición de la posición del anillo se realizó utilizando 2 sensores ultrasónicos HC-SR04. Estos sensores miden distancias por ultrasonidos y son capaces de detectar objetos y calcular la distancia a la que se encuentran en un rango de 1.7 a 450 cm. De manera general, su funcionamiento consiste en enviar el pulso de arranque y medir la anchura del pulso de retorno. La elección de estos sensores se fundamenta en su pequeño tamaño, buena precisión y bajo costo. Como se mencionó anteriormente, para accionar estos sensores se utilizó una tarjeta Arduino Mega 2560 y en conjunto con MATLAB® se almacenaron los datos adquiridos. En la figura 3 se muestra el arreglo de laboratorio que se realizó [(1) Anillo, (2) Sensores de posición, (3) Arduino Mega 2560, (4) Arduino Due, (5) Inversor, (6) Fuente de alimentación y (7) Transformador]. Al alimentar el sistema, el anillo alcanza una altura final, sin embargo, se mantiene oscilando debido a la distribución no uniforme de la masa y del campo magnético. Esto provocó algunos inconvenientes para medir adecuadamente su posición. Por ésta razón se adaptó una hoja de cartulina al anillo, para que los pulsos enviados por los sensores pudieran rebotar y también mantener más estable la posición del anillo.

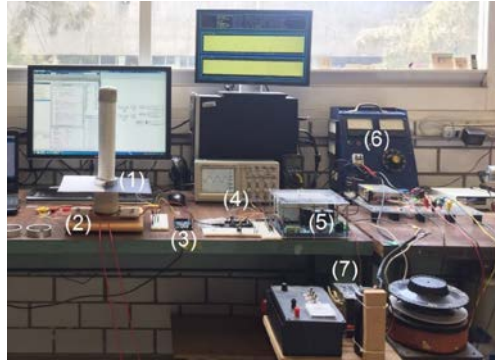


Figura 3 Arreglo de laboratorio.

### Caracterización de los sensores de posición y del inversor

En esta sección se presenta la caracterización de los sensores de posición y del inversor. Los autores consideran que la caracterización en términos de frecuencia deseada y voltaje en las terminales de salida del inversor es un aspecto de gran importancia debido a que las ecuaciones obtenidas de los ajustes se implementaron en los códigos computacionales para el control de las tarjetas Arduino. La figura 4 muestra la caracterización de los sensores de posición. La gráfica izquierda corresponde al sensor 1 ( $SP_1$ ), mientras que la gráfica derecha corresponde al sensor 2 ( $SP_2$ ). De acuerdo con la hoja de datos, la referencia de posición cero debe ser 1.7 cm por encima de los sensores ya que es la distancia mínima de medición. Sin embargo, no fue necesario ubicar la referencia de posición cero a 1.7 cm de los sensores, debido a que estos sensores miden la anchura del pulso de retorno. Por ello, la caracterización se llevó a cabo levantando el anillo desde su posición original (que se tomó como referencia de posición 0) hasta 25 cm en intervalos de 5 cm y lo que se registró fue el tiempo de retorno, midiendo así de forma indirecta la elevación.

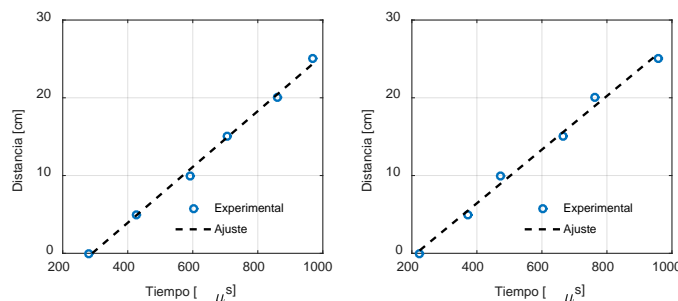


Figura 4 Caracterización de los sensores de posición.

La figura 5 muestra la caracterización del inversor. En el código computacional que se grabó en la tarjeta Arduino Due, fue necesario especificar un tiempo de retardo con el cual se modifica la frecuencia de los voltajes generados. En este trabajo se operó al anillo a 60 Hz, por lo que el tiempo de retardo se mantuvo constante. La gráfica izquierda corresponde a la caracterización de la frecuencia. De acuerdo con los resultados, la frecuencia máxima y mínima de trabajo son 157 y 10.37 Hz, respectivamente. De manera similar a la frecuencia, en el código computacional es necesario especificar el límite del ciclo de trabajo de los PWM. Si se modifica este límite, el voltaje eficaz en las terminales del inversor cambia. En otras palabras, si el ancho de pulso varía de 0 a 1 en las terminales del inversor se obtiene el voltaje máximo posible, si varía de 0 a 0.5 se puede obtener aproximadamente la mitad del voltaje máximo posible. La gráfica derecha de la Fig. 5 muestra el valor del límite del ciclo de trabajo en función del voltaje deseado en las terminales A y B del inversor. Es importante mencionar que existe un pequeño desbalance en los voltajes entre diferentes fases del inversor, por lo que se recomienda realizar una caracterización para cada fase.

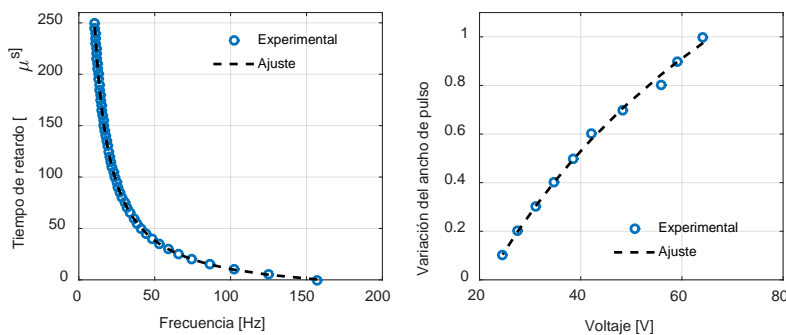


Figura 5 Caracterización del inversor.

#### 4. Códigos computacionales

En esta sección se describen brevemente los diagramas de flujo de los códigos computacionales implementados en las tarjetas Arduino y en MATLAB®. Los códigos computacionales de Arduino se conocen como *Sketch*. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo del *Sketch* implementado en la tarjeta Arduino Mega 2560 para la medición de posición. El *Sketch* está totalmente relacionado con el

programa que se elaboró en MATLAB® debido a que se encarga de almacenar los datos adquiridos por la Arduino Mega 2560. El diagrama de flujo del programa para almacenar la información se muestra en la figura 7.

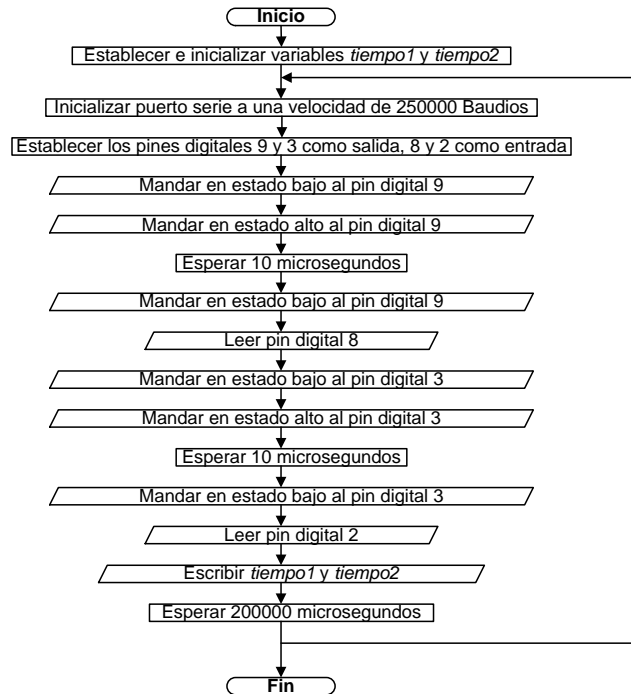


Figura 6 Diagrama de flujo para la medición de posición.

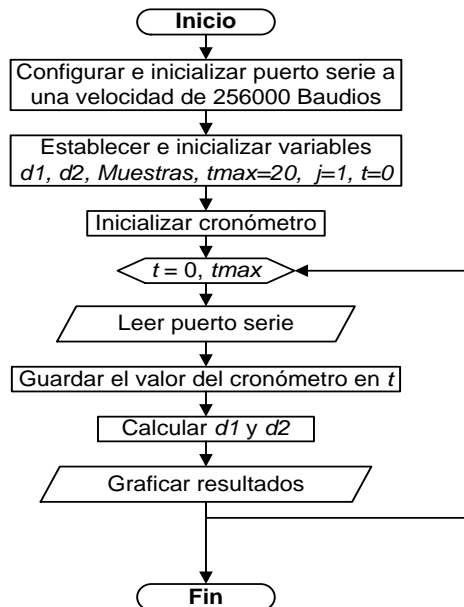


Figura 7 Diagrama de flujo para almacenar los datos



La figura 8 muestra el diagrama de flujo del Sketch que se grabó en la tarjeta Arduino Due para controlar el inversor. Se puede observar que se realiza la lectura del canal analógico AN0 de la tarjeta, donde se indica el voltaje eficaz que se desea tener en las terminales A y B del inversor. La base del Sketch fue tomada de trabajos existentes, si se desea conocer más acerca del almacenamiento de datos con Arduino se recomienda consultar [8, 9].

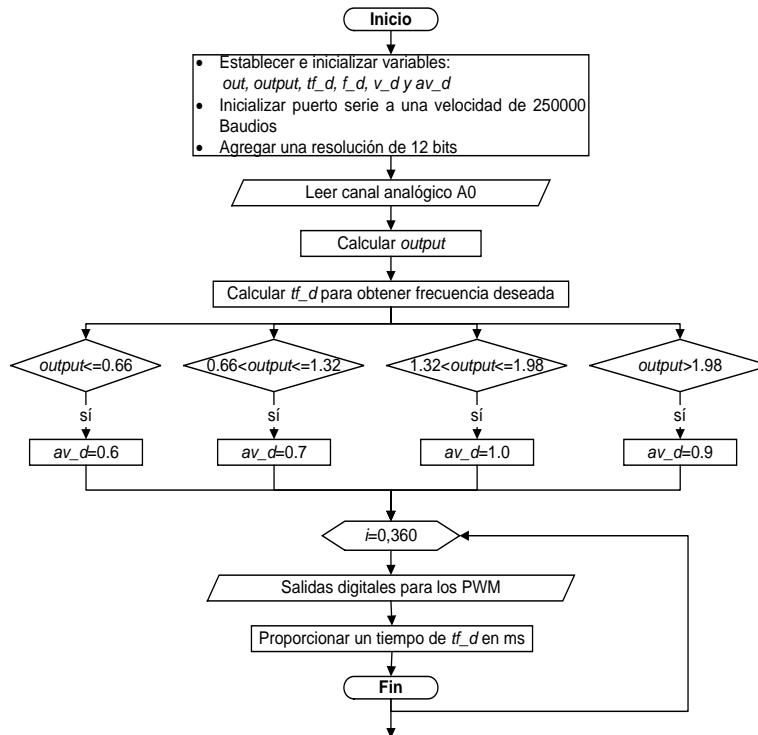


Figura 8 Diagrama de flujo para la programación de la Arduino Due.

## 5. Resultados

Se realizan las primeras pruebas experimentales para analizar el comportamiento de entrada y salida, el anillo se alimentó con 4 niveles de voltaje: 120, 145, 210 y 190 V. La figura 9 muestra la caracterización de la elevación del anillo en función del voltaje aplicado a su bobina.

En la figura 10 se muestra la comparación de la posición deseada y la experimental, que corresponde al promedio de la medición de cada sensor de posición. Se puede observar que después de 12 s, los resultados no son favorables porque la temperatura del anillo se incrementa y sus parámetros

cambian. Además, la elevación deseada del anillo se realizó con base en la caracterización de la figura 9, la cual se llevó a cabo cuando el anillo se encontraba a temperatura ambiente para cada uno de los valores tomados. Como trabajo futuro se realizaran pruebas de control en lazo cerrado para eliminar este tipo de errores.

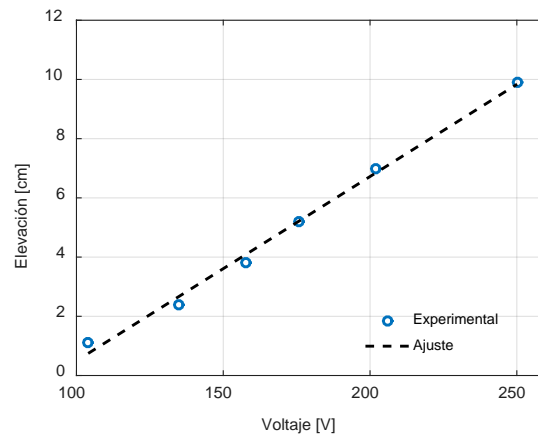


Figura 9 Elevación del anillo de Thomson.

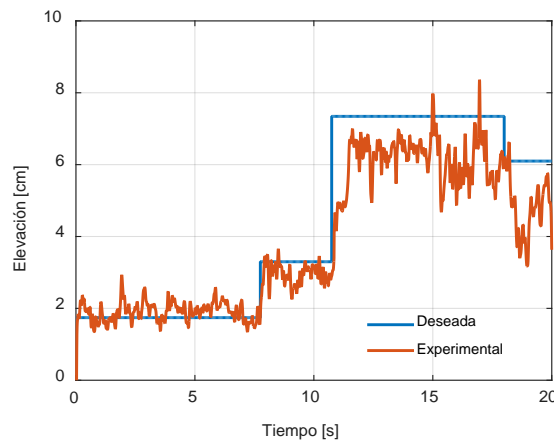


Figura 10 Posición del anillo de Thomson.

La figura 11 muestra el voltaje aplicado en la bobina y la corriente que fluye en ella. Se pueden observar las variaciones de los niveles de voltaje y de corriente. Finalmente, la figura 12 muestra al anillo de Thomson levitando durante los experimentos.

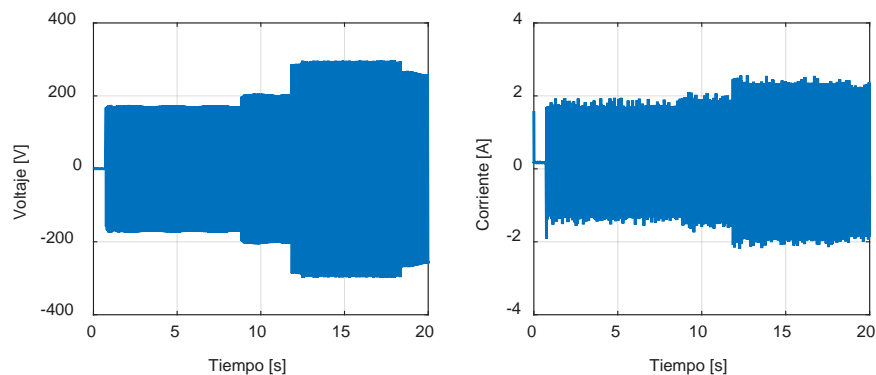


Figura 11 Voltaje y corriente en las bobinas del anillo de Thomson.



Figura 12 Anillo de Thomson levitando.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se presentó el control en lazo abierto la posición del anillo de Thomson utilizando un inversor trifásico controlado por una tarjeta Arduino. Los resultados experimentales muestran que el control en lazo abierto funciona bien para tiempos cortos y donde los parámetros eléctricos del anillo no cambien. La resistencia en anillo puede cambiar debido al aumento de temperatura, esto impide que el control en lazo abierto tenga resultados favorables. Para mejorar los resultados, se recomienda realizar un control en lazo cerrado con retroalimentación de la posición.

El sistema que se presenta es de mucho interés para los estudiantes ya que contiene diferentes disciplinas como son las máquinas eléctricas, computación, electrónica y control. El uso de estos sistemas en las aulas de clase es de mucha

ayuda para el entendimiento de las materias, se recomienda utilizar este tipo de sistemas con los estudiantes para desarrollar su conocimiento e interés en las nuevas tecnologías

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] D. Alferov, A. Budovsky, D. Evsin, V. Ivanov, V. Sidorov, V. Yagnov, "DC vacuum circuit-breaker". IEEE. 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Vol. 1. Pp. 173-176.
- [2] J. Guzmán, F. J. González-Montañez, R. Escalera-Pérez, J. C. Olivares-Galván, V. M. Jiménez Mondragon, "Numerical Modeling of the Thomson Ring in Stationary Levitation Using FEM-Electrical Network and Newton-Raphson". Ingeniería, investigación y tecnología. Vol. 16. Núm. 3. 2015. Pp. 431-439.
- [3] N. Barry, R. Casey, "Elihu Thomson's jumping ring in a levitated closed-loop control experiment". IEEE Transactions on Education. Vol. 42. Issue1. 1999. Pp.72-80.
- [4] S. Monk, 30 Arduino projects for the evil genius. Second Edition. 2013. McGraw-Hill Professional.
- [5] Ó. Artero Torrente, Arduino: curso práctico de formación. Primera edición. 2013. Alfa Omega Grupo Editor. México D. F.
- [6] N.O. Sadiku Matthew, Elements of Electromagnetics. Fifth Edition. 2010. Oxford University Press.
- [7] W. H. Hayt, J. A. Buck, Teoría electromagnética. Séptima Edición. 2006. McGraw-Hill.
- [8] M. A. M. Azmi, H. Daniyal, M. S. Bakar, "Realization of Three-Phase Voltage Source Inverter Controller Using Arm Cortex-M3". International Journal of Energy and Power Engineering Research. Vol. 2. Num. 1. 2014. Pp. 1-5.
- [9] M. A. M. Azmi, H. Daniyal, M. S. Bakar, "Three-phase variable speed drive using ARM Cortex-M3". 3rd IET International Conference on Clean Energy and Technology (CEAT). 2014. Pp. 1-4.

## **8. Autores**

Hiram Alberto Canseco García (Ixtepec, Oaxaca). Ingeniero Electricista por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como auxiliar académico en el departamento de Energía. Está interesado en las máquinas eléctricas, las energías alternativas, los mercados eléctricos y en el uso de software computacional para optimizar procesos.

Felipe González Montañez (México, D.F.). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Mecatrónica en el CINVESTAV unidad Zacatenco. Actualmente es profesor investigador del Área de Ingeniería Energética y Electromagnética en el Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

José Jiménez González (México, D.F.). Ingeniero Electricista por la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A), donde se desempeña trabajando como auxiliar de investigación. Está interesado en el modelado, análisis y control de máquinas eléctricas.

Ricardo Guadalupe Torres Carmona (México, D.F.). Estudiante de licenciatura en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). Está interesado en las máquinas eléctricas y en la implementación de las tarjetas Arduino para aplicaciones en la Ingeniería Eléctrica.

José Luis Hernández Ávila (México, D.F.). En 1990 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A). En 1996 obtuvo el grado de Doctor por la Université Joseph Fourier de - Grenoble I, Grenoble.

E. Campero-Littlewood (México D.F.). En 1969 obtuvo el grado de Ingeniero Mecánico Electricista otorgado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (con especialidad en máquinas eléctricas y sistemas de potencia), por el Imperial College of Science and Technology, de la Universidad de Londres, Inglaterra, en

enero de 1977. Se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A) en enero de 1977, donde es Profesor Titular “C” de tiempo completo. Ha ocupado diversos cargos dentro de la institución de los cuales destacan Jefe de departamento de Energía en el periodo 1980-1984 y Director de División de Ciencias Básicas e Ingeniería en el periodo 2000-2004. Ha impulsado diversos programas de impacto en el ahorro de la energía eléctrica dentro de la misma universidad. Sus áreas de interés en investigación son análisis y diseño de máquinas eléctricas, el ahorro y aprovechamiento de la energía.

# DESARROLLO, MODELADO Y CONTROL DE UN SISTEMA MECATRÓNICO DE POSICIÓN ANGULAR

***Mark Billy Pablo Hernández***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*Mark.pablo@hotmail.com*

***Roberto A. Alcántara Ramírez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*raar@correo.azc.uam.mx*

***Jorge Miguel Jaimes Ponce***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*jjp@correo.azc.uam.mx*

***Irma Irasema Siller Alcalá***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*sai@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Generalmente cuando se estudia el control de sistemas mecatrónicos, es con base en sistemas comerciales, lo cual es importante porque se ahorra tiempo, sin embargo, el conocimiento adquirido en el desarrollo de estos sistemas, desde su concepción, el diseño mecánico y electrónico, caracterización, modelado y experimentación son importantes para el desarrollo de nuevos sistemas y el control de estos. En este trabajo se presenta el modelado matemático de un balancín con motor y hélice, así como el monitoreo y control de posición, mediante leyes de control clásicas. Cabe mencionar que este proyecto se ha desarrollado en su totalidad, incluyendo el sistema electrónico de control, hardware y software para PC. El modelo se obtuvo de forma experimental y a partir de este se diseñó e implementó, el control. Además, se comparan los resultados obtenidos en tiempo real con las simulaciones realizadas en Inventor y Matlab, para validar el modelo.

**Palabra(s) Clave(s):** Diseño mecánico de un balancín, mecatrónica, modelado matemático, posición angular, PID, sistema aerodinámico.

## **1. Introducción**

Este trabajo se presenta el control de posición de un balancín con motor y hélice basado en su modelado matemático, el cual fue obtenido considerando los conceptos básicos que involucra la rotación de cuerpos rígidos y la dinámica del movimiento rotacional [1], se realizó una comparación con la simulación del mismo, utilizando software comercial como Inventor [2] y Matlab [3]. Está pensado para su aplicación en docencia e investigación, dado que análogamente funciona como una parte del control de vuelo vertical de una aeronave tipo helicóptero de una manera muy simple, similar a los sistemas comerciales [4,5], controlando la posición o giro de un balancín respecto de un eje y un punto de apoyo, mediante un motor con hélice acoplado a una barra. De forma básica se llega a un modelo matemático del sistema mecánico rotacional, haciendo uso de la segunda ley de Newton [6], para obtener las componentes de torque que integran al sistema, se realiza simulación, llevando a cabo un análisis comparativo con datos experimentales, además se implementa el segundo método Ziegler Nichols [7], para sintonizar un controlador PID el cual intentara controlar el sistema. Es conocido que la enseñanza de la teoría de control resulta a menudo difícil cuando su estudio es muy abstracto, sin embargo cuando se aplica en algún proceso ya sea industrial o algún prototipo, se despejan dudas, adquiriendo de esa manera un conocimiento real y significativo.

## **2. Desarrollo**

De forma general el sistema desarrollado está constituido por diferentes etapas, y tiene la propiedad de controlar y monitorear mediante interfaz gráfica la posición angular de un balancín controlando la velocidad de un motor con hélice. La figura 1, muestra de forma muy general cómo está conformado el sistema, sin embargo a pesar de que está constituido de varios bloques que trabajan en conjunto, en este documento solo se presenta el modelado con base en el sistema mecánico,



así como la simulación y prueba de un controlador PID sintonizado con el segundo método de Ziegler Nichols, el cual se implementa en el software desarrollado, en programación Java para una computadora personal.

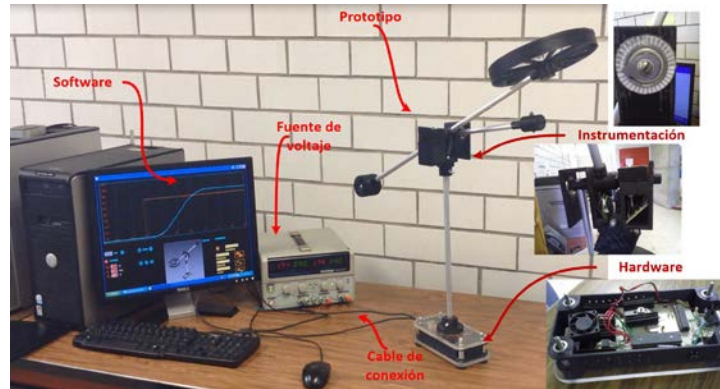


Figura 1 Etapas del sistema desarrollado.

### Diseño mecánico

El diseño mecánico del prototipo está dividido en tres partes. *Base*, *Cuerpo* y *Balancín*, figura 2, los cuales son diseñados en el software Inventor y fabricado en impresora 3D con plástico PLA, también se utiliza placas de acrílico, tubo de aluminio y componentes como lo son tornillos, tuercas, rondanas de presión, etc. Las piezas se han diseñado con una serie de elementos que facilitan la colocación y ensamblaje, además de la fabricación de piezas para colocar en su interior circuitos electrónicos de procesamiento analógico y digital, otras se han diseñado con orificios para colocar los soportes del prototipo y algunas placas con la finalidad de servir como soporte para los circuitos impresos. Algunos tubos sirven de canales para los cables de conexión hacia el motor y el sensor de posición angular, las piezas también cuentan con una simetría que propone una estética atractiva al usuario.

### Dinámica rotacional del sistema

Se considera al sistema, como un conjunto conformado por piezas fijas y otras con la capacidad de girar desde el eje de rotación, Estas no cambiarán de forma ni volumen mientras se mueven, de igual forma se puede considerar como un

conjunto de masas puntuales que están separadas por distancias fijas, que tienen la propiedad de desplazarse respecto de un origen. Tomando en cuenta el razonamiento anterior, las piezas acopladas que se mantiene fijas unas de otras respecto del eje, se pueden considerar como un cuerpo rígido. En la figura 3 se observa lo anteriormente planteado, en dónde se tiene un cuerpo rígido P constituido por varias piezas que gira sobre un eje O respecto de una distancia R.

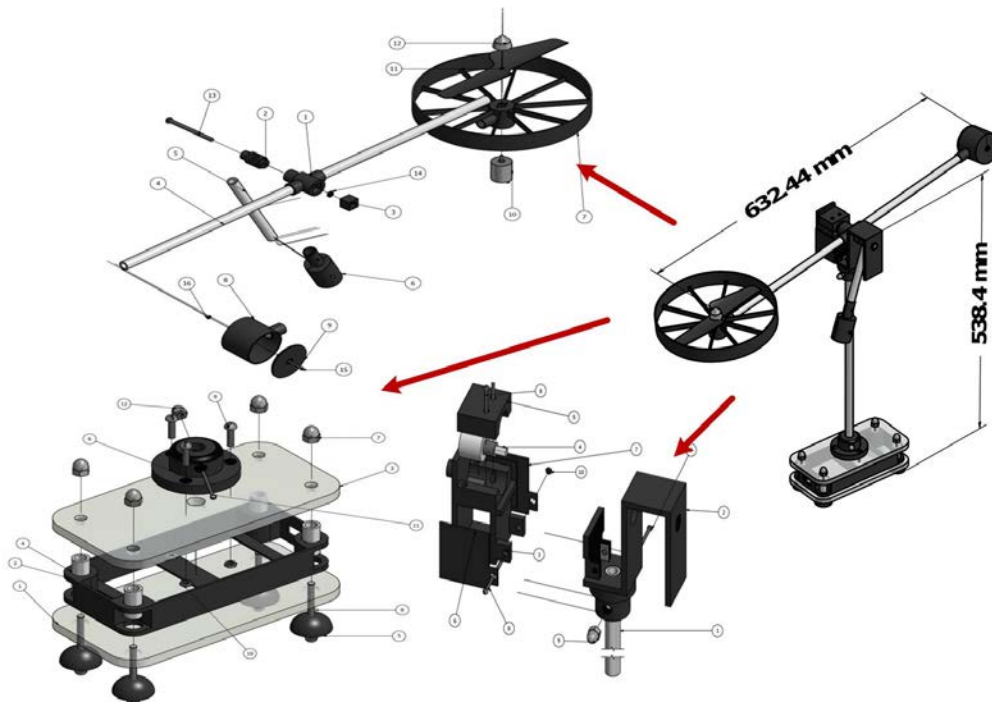


Figura 2 Conjunto de piezas mecánicas que conforman al sistema.

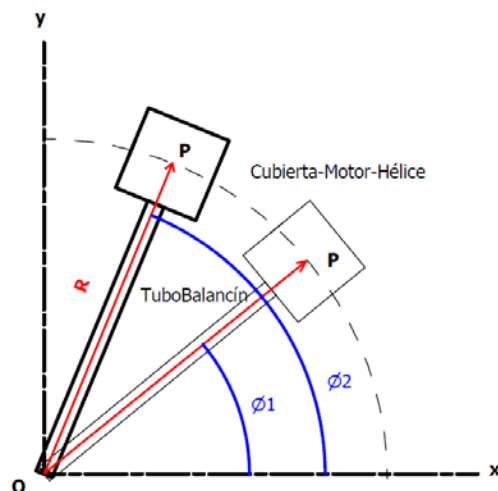


Figura 3 Conjunto de piezas acopladas a manera de cuerpo rígido.

Para el análisis del movimiento de rotación se utiliza el sistema de coordenadas polares y facilitando su análisis, mediante el uso de un ángulo de referencia  $\Theta$  medido a partir del eje X y de una distancia R desde el origen, ahora bien, de tal forma que la única magnitud que varía es el ángulo.

Para el análisis del sistema es de gran importancia considerar el momento de inercia total, el cual es una magnitud escalar análoga a la masa inercial del movimiento lineal, pero esta, se opone al cambio de la velocidad angular, en algunas ocasiones es producida por varios momentos de inercia del cuerpo rígido, este refleja la distribución de masa de un cuerpo o sistema de partículas en rotación respecto de un eje de giro que no depende de las fuerzas que intervienen para producir movimiento, ecuación 1.

$$I = \sum m_i \cdot I_i \quad (1)$$

Donde I es la distancia de la masa puntual m al eje de rotación; para un cuerpo de masa continua es necesaria una sumatoria de masas y distancias que definen el momento de inercia, por lo que se utiliza una integral y a la constante  $\rho$  que es la densidad del material, ecuación 2.

$$I = \int_m r^2 dm = \int_V \rho r^2 dV \quad (2)$$

Para el análisis del momento de inercia del sistema, se considera únicamente el conjunto de piezas fijas acopladas a un eje de rotación  $O$  que incluye los contrapesos en los extremos, la hélice con el motor, la cubierta y las conexiones de los dos tubos, que para fines más prácticos a este conjunto se le llama  $U_R$ , como se observa en la figura 4.

Primero para obtener el momento de inercia de  $U_R$  de manera teórica, se calcula el momento de inercia de cada una de las partes que lo conforman, considerando un eje de rotación común, y en segundo lugar integrar todas las partes mediante una sumatoria, ecuación 3.

$$I_{Tot} = I_{Tubo-Principal} + I_{Tubo-Contrapeso} + I_{Cubierta-Motor-Hélice} + I_{Contrapeso} + I_{Contrapeso-Estabilizador} \quad (3)$$

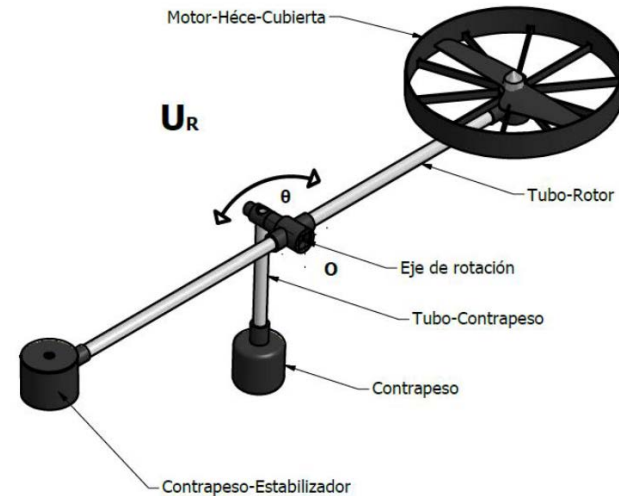


Figura 4 Conjunto de piezas fijas acopladas a un eje de rotación.

### Obtención del momento de inercia de manera teórica

Se inicia con el cálculo del momento de inercia de los tubos del prototipo figura 5 y figura 6 usando la relación que existe para la barra con eje al centro y en el extremo de una barra, obtenida de tablas [1], cabe señalar que estas expresiones son producto de la ecuación 2.

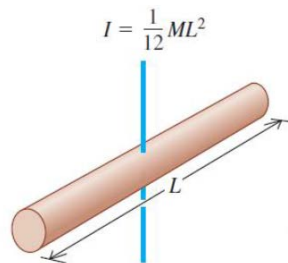


Figura 5 Barra con eje en el centro.

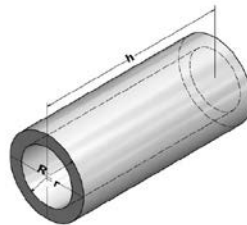


Figura 6 Tubo de aluminio.

Como se observa de la expresión figura 5, solo es necesario obtener la masa  $M$  de la barra de longitud  $L$ , por lo cual se utiliza la ecuación 4 que involucra a su vez el volumen  $V$  del sólido y la densidad del material  $\rho$ .

$$p = M / V \quad (4)$$

El volumen del tubo es calculado utilizando la fórmula común para un cilindro, ecuación 5.

$$V = \pi r^2 h \quad (5)$$

Para el cálculo de volumen de un tubo se considera un cilindro exterior y uno interior, de esta manera la fórmula del volumen total es la resta de los dos volúmenes de los cilindros, figura 6.

Por lo tanto, se tiene ecuación 6.

$$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h = \pi h (R^2 - r^2) = \frac{\pi}{4} h (D_{Ext}^2 - D_{Int}^2) \quad (6)$$

Entonces la masa del tubo principal está dada por la ecuación 7.

$$M = \frac{\pi}{4} h p_{Aluminio} (D_{Ext}^2 - D_{Int}^2) \quad (7)$$

Y el momento de inercia por la ecuación 8

$$I_{Tubo-Rotor} = \frac{\pi}{48} p_{Aluminio} h L^2 (D_{Ext}^2 - D_{Int}^2) \quad (8)$$

Sustituyendo las medidas reales del *Tubo-Rotor* y la densidad del material del aluminio, se obtiene:

$$\begin{aligned} I_{Tubo-Rotor} &= \frac{\pi}{48} (2.7 \text{ g/cm}^3) (60 \text{ cm})^3 \left( (1.3 \text{ cm})^2 - (0.9 \text{ cm})^2 \right) \\ &= (33589.9086) (g \cdot \text{cm}^2) \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left( \frac{100 \text{ mm}^2}{1 \text{ cm}^2} \right) \\ &= 3358.99 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 \approx 3359 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 \end{aligned}$$

Ahora bien, el tubo que sostiene el contrapeso tiene el origen en el extremo por lo tanto se usa la expresión de la figura 7, la cual es la relación que existe para obtener el momento de inercia para una barra con origen en un extremo.

Siguiendo los pasos descritos anteriormente para obtener la masa y finalmente el momento de inercia, se obtiene la ecuación 9

$$I_{Tubo-Contrapeso} = \frac{\pi}{12} p_{Aluminio} h L^2 (D_{Ext}^2 - D_{Int}^2) \quad (9)$$

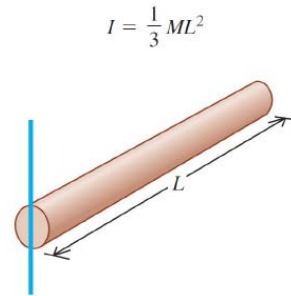


Figura 7 Barra con eje en el extremo.

Sustituyendo las medidas reales del Tubo-Contrapeso y la densidad del material del aluminio, se obtiene:

$$I_{Tubo-Contrapeso} = \frac{\pi}{12} (2.7 \text{ g/cm}^3) (15 \text{ cm})^3 \left( (1.3 \text{ cm})^2 - (0.9 \text{ cm})^2 \right)$$

$$= 2099.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 = 209.93 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 \approx 210 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$$

### Obtención del momento de inercia por simulación

Para obtener el momento de inercia por simulación, se utiliza el software para el modelado paramétrico de sólidos en 3D llamado Autodesk Inventor, éste proporciona las características físicas de la pieza figura 8, se observa gráficamente la interfaz de usuario del programa en donde se visualiza las propiedades físicas de la pieza y el centro de gravedad, el cual es de gran importancia para la obtención del momento de inercia, en este caso se visualiza el tubo llamado “Tubo-Rotor”.

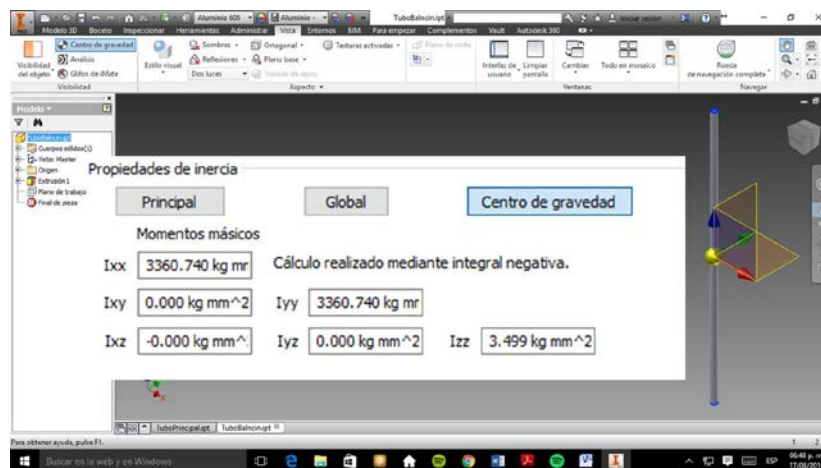


Figura 8 Barra con eje en el extremo.

Por lo tanto de la simulación se obtiene:

$$I_{Tubo-Rotor-Simulado} = 3360.7470 \text{ kg } mm^2$$

De igual forma, para el tubo llamado “*Tubo-Contrapeso*”; sin embargo mediante la simulación se obtiene el momento de inercia que se encuentra en el centro de masa, además de las figura 4 y 7 sabemos que el origen está en un extremo, por lo tanto se utiliza el Teorema de Steiner de ejes paralelos, para la obtención del momento de inercia en un diferente eje de rotación, este eje debe ser paralelo al otro y tiene la notación de  $I_p$ , ecuación 10.

$$I_p = I_G + mr^2 \quad (10)$$

Además para utilizar este método se debe tener presente la masa total de la pieza  $m$  y la distancia entre los dos ejes  $r$ , estos valores se obtienen finalmente de la simulación.

$$I_{Tubo-Contrapeso-Simulado} = 52.9 \text{ kg } \cdot mm^2 + (0.028 \text{ kg})(75 \text{ mm})^2$$

$$I_{Tubo-Contrapeso-Simulado} = 210.4 \text{ kg } \cdot mm^2$$

### Obtención del momento de inercia total con simulación y datos experimentales

Como se puede observar la simulación nos permite simplificar de manera considerable el trabajo de realizar cálculos; así para demostrar su eficiencia y el compromiso de fiabilidad se hace una demostración comparando y obteniendo el error de los resultados anteriores para los dos tubos que conforman al sistema en la tabla 1.

Tabla 1 Comparación de los datos teóricos y simulados obtenidos del momento de inercia.



Nombre	Teórico	Simulado	Error	Error relativo
$I_{Tubo-Rotor}$	3359 $kg \cdot mm^2$	3360.7470 $kg \cdot mm^2$	1.747	0.0519
$I_{Tubo-Contrapeso}$	2010 $kg \cdot mm^2$	210.4 $kg \cdot mm^2$	0.4	0.0019

Se observa que el error es mínimo por lo tanto se comprueba que la simulación proporciona un momento de inercia muy aproximado al calculado teóricamente, en consecuencia resulta oportuno descartar los cálculos teóricos para el momento de inercia facilitando el trabajo en el análisis de piezas más complejas, como es el caso del conjunto de piezas llamado  $U_R$  el cual se encuentra representado en la Fig. 4, que como se puede observar la estructura está constituida por piezas que contienen diferentes materiales, de los cuales se destaca el aluminio y las piezas construidas por la impresora 3D, por lo tanto, para el aluminio la densidad del material es muy conocida, sin embargo para el plástico la densidad del material varía de acuerdo al porcentaje de relleno en la impresión y por lo tanto de los espacios residuales entre cada fibra de plástico, por lo que es necesario obtener este dato experimentalmente, así primero se obtiene la masa de forma experimental para este material con la ayuda de una balanza analítica, preferentemente de una pieza pequeña fabricada por la impresora 3D, luego el volumen se obtiene de la simulación, finalmente se sustituyen los datos obtenidos en la ecuación 4, el resultado es la constante de la densidad del material para el plástico utilizado.

$$P_{PlasticoImpresora} = 1.315 \text{ g / cm}^3$$

Para comprobar se seleccionando una pieza al azar del sistema, con un volumen de  $5.251 \text{ cm}^3$  obteniendo su masa en la simulación, como se ve en la tabla 2, y comprobando de forma experimental.

Tabla 2 Comprobación de la densidad del plástico de las piezas.

Experimental	Simulación
	
Masa = 6.9333 g	Masa = 7 g



Como se observa la masa de la pieza es muy aproximada, así la constante cumple el objetivo, por consiguiente se sustituye este dato en los parámetros de la simulación. Por otra parte es de gran importancia conocer la densidad del material de las demás piezas que conforman al sistema como lo es el motor con sus elementos internos, la hélice y sus piezas de ensamble, figura 9, sin embargo esto resulta de gran dificultad por la variedad de componentes, para solucionar este problema se toma todo el conjunto el cual tiene el nombre de “*Conjunto Motor*” como una masa puntual en el sistema, obteniendo la ecuación 11.

$$M_{ConjuntoMotor} = M_{TuercaHelice} + M_{HeliceMotor} + M_{MotorElectrico} \quad (11)$$

$$M_{ConjuntoMotor} = 56.1704 \text{ g}$$



Figura 9 Conjunto Motor.

De acuerdo a lo anterior se sustituye los valores obtenidos experimentalmente a los parámetros de la simulación cuidando que el *Conjunto Motor*, los tubos y las piezas, tengan aproximadamente la masa obtenida experimentalmente.

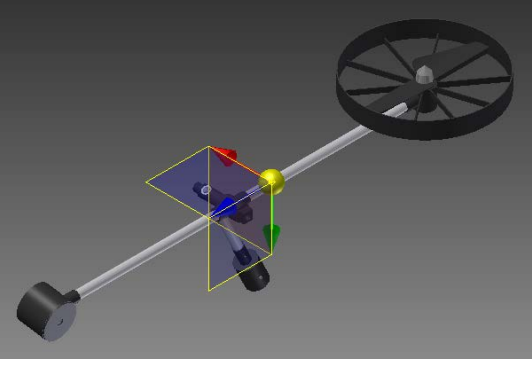
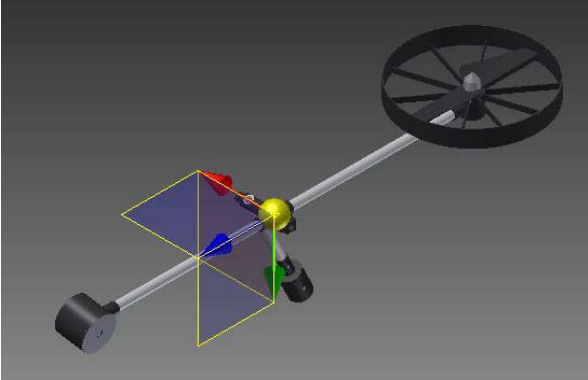
Por último, es necesario calcular y colocar el contrapeso para que el sistema se encuentre en equilibrio cuando el *Tubo-Contrapeso* se encuentre perpendicular al *Tubo-Rotor*, tabla 3, de esta manera el sistema cumplirá su objetivo cambiando su centro de masa y por consiguiente su comportamiento al manipular únicamente el *Tubo-Rotor*.

Por lo tanto los valores obtenidos mediante los datos experimentales y simulados del momento de inercia total y la masa total son:

$$I_{Tot} = (27226.018 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2) \left( \frac{1 \text{ m}^2}{(1000)^2 \text{ mm}^2} \right) = 0.02722 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$m_{Tot} = 0.428 \text{ kg}$$

Tabla 3 Comparación entre el uso del contrapeso para estabilizar el sistema.

Sin el contrapeso estabilizador	Con el contrapeso estabilizador
	

Los brazos de palanca del sistema son:

$$B1 = (320 \text{ mm}) \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) = 0.32 \text{ m}$$

$$B2 = (220 \text{ mm}) \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ m}} \right) = 0.22 \text{ m}$$

El coeficiente de fricción está determinado por el Balero que se encuentra entre el eje del conjunto llamado *Balancín* y la base para el eje del conjunto llamado *Cuerpo* y tiene el siguiente valor:

$$b_{\text{CoeficienteFriccion}} = 0.15$$

### Modelo matemático del Sistema

Es preferible siempre obtener un modelo razonablemente simplificado, por lo que resulta necesario no incluir ciertas propiedades físicas inherentes al sistema realizando así un modelo considerablemente simplificado, para obtener una idea general de la solución, utilizando ecuaciones y esquemas de sistemas mecánicos rotacionales ya conocidos los cuales son análogos al sistema real figura 10 y figura 11, como se puede observar, existe un momento de inercia que integra todas las partes mecánicas que conforman al sistema, se observa también que existen dos fuerzas sobresalientes, las cuales producen un *Torque* sobre la pieza, la primera fuerza  $F_e$ , es la fuerza de elevación producida por el motor con la hélice localizada en uno de los extremos del tubo a una distancia o brazo de palanca  $B1$ ,

la segunda fuerza que actúa sobre el cuerpo es  $Fg3$ , que es la fuerza producida por la gravedad en una tercera masa con un brazo de palanca  $B2$ , la fuerza dominante del sistema es  $Fe$ , la cual produce una velocidad y aceleración angular.

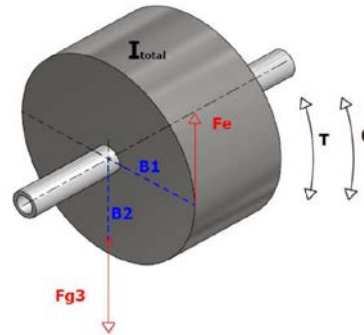


Figura 10 Modelo simple de un sistema dinámico.

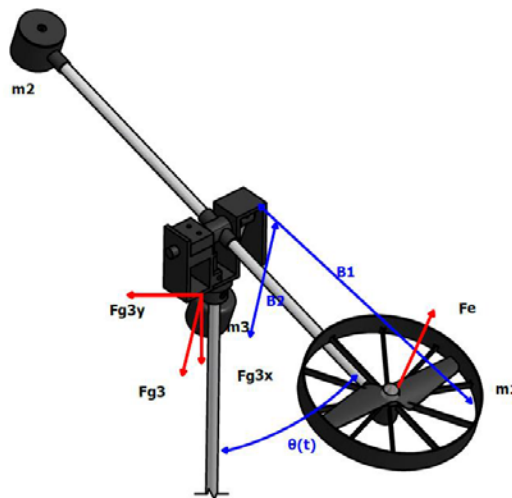


Figura 11 Sistema dinámico.

Por lo tanto, se obtiene la ecuación 12

$$T = I_{Total} \cdot \theta'' = Fe \cdot B1 - Fg \cdot B2 - b(\theta') \quad (12)$$

Pasando al dominio de la frecuencia y sustituyendo condiciones iniciales nulas además de considerar  $\text{sen}(\theta) = \theta$  para cambios pequeños de ángulo, se obtiene ecuación 13.

$$\frac{\theta_{(s)}}{Fe} = \frac{\frac{B1}{I_{total}}}{s^2 + \frac{b}{I_{Total}}s + \frac{Fg \cdot B2}{I_{Total}}} \quad (13)$$

Sustituyendo los datos se obtiene:

$$\frac{\theta_{(s)}}{Fe} = \frac{11.75}{s^2 + 5.51s + 79.28}$$

### 3. Resultados

Mediante Matlab se analiza y compara la respuesta del sistema simulado y la respuesta del sistema real (figura 12), de acuerdo a los resultados obtenidos, se sabe que el sistema tanto real como simulado son de segundo orden y de un grado de libertad, además su comportamiento es subamortiguado y su coeficiente de amortiguamiento es menor a 1.

En la señal del sistema real se aprecia un desfase con respecto a la señal simulada, debido al procesamiento digital de la computadora y el microcontrolador del hardware, además de un cierto valor de offset de 4 grados, debido a las imperfecciones mecánicas, produciendo mayor fricción en las piezas del prototipo, lo cual también produce que el sistema real tenga mayor amortiguamiento, con respecto al sistema simulado como se puede observar en la gráfica, en cuanto a los valores negativos de amplitud en la señal del sistema simulado, estos no existen en el sistema real debido a las limitantes mecánicas.

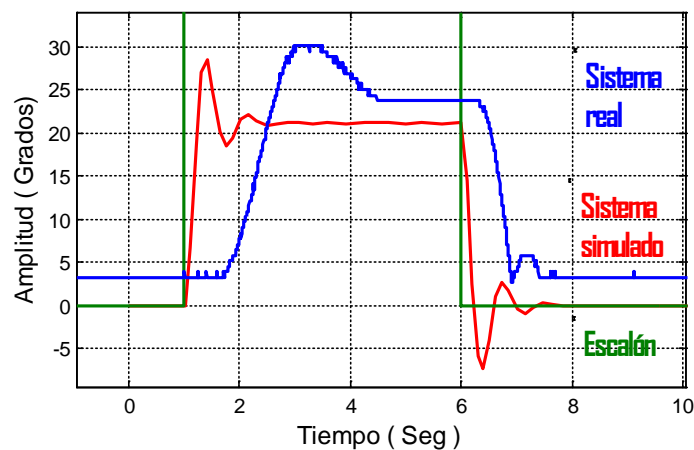


Figura 12 Comparación de la función de transferencia y el sistema real.

Para sintonizar el controlador en este trabajo, se aplica el segundo método de Ziegler Nichols, al modelo matemático y al arreglo experimental del sistema real figura 13, debido a su rapidez y facilidad, obteniendo así:

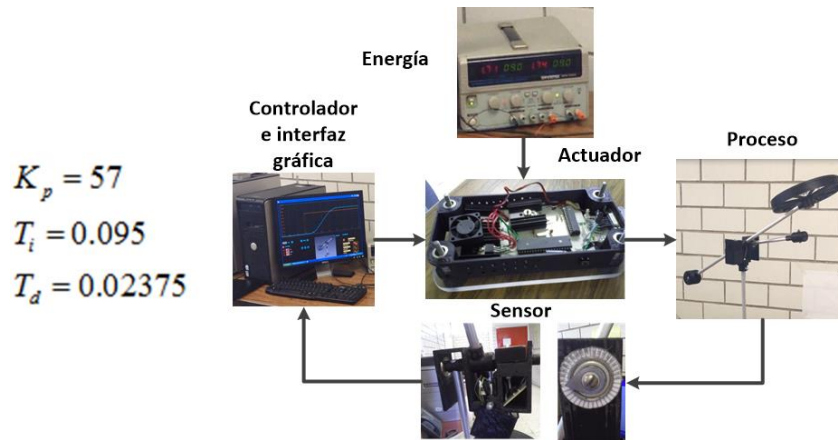


Figura 13 Arreglo experimental del sistema.

Como se observa en la tabla 4, el controlador en la parte de la simulación reduce el tiempo de establecimiento considerablemente, para llegar a la referencia que es 1 rad (57.29°) sin embargo se puede notar que existe un error constante debido a la no linealidad del sistema, mismo que también se refleja en el sistema real, aunque las oscilaciones y tiempo de establecimiento son ligeramente mayores.

Tabla 4 Controlador implementado.

Control sistema simulado	Control sistema real

#### 4. Discusión

Se esperaba mayores oscilaciones en el sistema real figura12, la razón podría ser las constantes de fricción y fuerzas no previstas, aunque se debe de dar crédito al modelo matemático y su respuesta simulada, ya que actúa como un modelo ideal que sirve para fines de análisis, en comparación del sistema real donde algunos factores no considerados si actúan sobre éste.

En el caso del controlador utilizado PID, tabla 4, se observa que no es el controlador adecuado, ya que el sistema es no lineal, por lo tanto, los valores se tienen que modificar para el sistema real, un problema también puede ser el software y comunicación con la computadora para efectuar los cambios pertinentes, otra solución al problema será replantear el modelo matemático o el diseño electrónico.

## 5. Conclusiones

El desarrollo del modelo matemático obliga a repasar conocimientos de física y de sistemas de control, resultando de gran ayuda para entender y comprender el comportamiento del sistema, además se encontró de gran utilidad el uso de la simulación para encontrar parámetros físicos desplazando así la obtención de estos por medio de fórmulas, análisis y cálculos, logrando de esta manera simplificar el trabajo, obteniendo un modelo matemático muy aproximado al sistema real.

Al implementar el algoritmo de control PID al prototipo, se obtuvo una respuesta considerable aunque el comportamiento resultó ser no lineal, por lo que se obtuvo un error constante, el trabajo a futuro es utilizar un controlador no lineal para mejorar la respuesta.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Hugh D. Young, Roger A. Freedman, Física Universitaria: Sears Zemansky Volumen 1, Decimosegunda Edición. 2009. Pearson Educación. México Pp. 285-342.
- [2] Inventor, <http://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor/overview>, Abril 2016.
- [3] Matlab. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. Abril 2016.
- [4] Twin Rotor MIMO. [http://www.feedback-instruments.com/products/education/control\\_instrumentation/twin\\_rotor\\_mimo](http://www.feedback-instruments.com/products/education/control_instrumentation/twin_rotor_mimo). Abril 2016.
- [5] Two Rotor Aerodynamical System. <http://www.inteco.com.pl/products/two-rotor-aerodynamical-system/>. Abril 2016.

- [6] N. S. Nise, Control Systems Engineering. Sixth Edition. 2010. John Wiley & Sons, Inc. Page 70.
- [7] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Prentice-Hall, Inc. México. Pp. 672-679.

## **7. Autores**

Ing. Mark Billy Pablo Hernández: Es egresado de la carrera en Ingeniería Electrónica de la UAM Azcapotzalco. Actualmente es ayudante en el área de investigación de Control de Procesos adscrito al Departamento de Electrónica de la UAM Azcapotzalco.

M.C. Roberto A. Alcántara Ramírez: Ingeniero en Electrónica, por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el TESE. Desde 1987 se desempeña como Profesor Investigador de tiempo completo en el departamento de Electrónica de la UAM Azcapotzalco, donde desarrolla trabajos de Investigación en las áreas de Electrónica de Potencia y Control de Procesos.

M.C. Jorge Miguel Jaimes Ponce: Ingeniero en Electrónica, por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el TESE Desde 1990 se desempeña como Profesor Investigador de tiempo completo en el Departamento de Electrónica de la U.A.M. Azcapotzalco, donde desarrolla trabajos de Investigación en las áreas de Instrumentación, Electrónica Digital, Electrónica de Potencia y Mecatrónica.

Dra. Irma Irasema Siller Alcalá: Realizó la licenciatura en Física en la Universidad de N. L., la Maestría en Ingeniería Eléctrica especialidad Control Automático en el CINVESTAV del IPN, en 1998 obtuvo el doctorado en la misma especialidad en el Departamento de Ingeniería Mecánica en la Universidad de Glasgow, Escocia. Desde 1988 es Profesora Investigadora en la UAM Azcapotzalco, Realiza investigación en sistemas no lineales a través del control predictivo.

# **DISEÑO DE PROTOTIPO PARA MEJORAR LA DICCIÓN MEDIANTE EL USO DE MODELOS OCULTOS DE MARKOV**

***Ángel David Pedroza Ramírez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*P.A.D\_16@hotmail.com*

***José Ismael de la Rosa Vargas***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*joseismaelrv@gmail.com, ismaelrv@ieee.org*

***Ernesto García Domínguez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*ers680807@yahoo.com.mx*

***Hamurabi Gamboa Rosales***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*hamurabigr@hotmail.com*

***Aldonso Becerra Sánchez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
*A7donso@hotmail.com*

## **Resumen**

La comunicación oral en el ser humano es muy importante, sin embargo, la buena comunicación, independientemente del idioma, debe ser clara, objetiva y expresiva con el fin de que lo que se quiere expresar sea lo que el oyente entienda. El reconocimiento de voz, por otro lado, se basa en el estudio sobre el proceso del habla y la comunicación, y la forma en que este conocimiento puede ser aplicado como herramienta para diversas finalidades. El enfoque de esta



investigación es el desarrollo de un prototipo didáctico para realizar pruebas de dicción en el idioma español. Para ello, se utilizaron 3 técnicas basadas en Modelos Ocultos de Markov (HMM) las cuales son Modelos Ocultos de Markov con DTW (MDTW), Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximado por izquierda y derecha (MID) y Modelos Ocultos de Markov con relleno de palabras (MRP). Con esta estructura se logró distinguir entre calidades de dicción y con una eficiencia de reconocimiento por encima del 90 % para cualquiera de las técnicas utilizadas. Finalmente, con base en lo anterior, se programó una interfaz en Matlab la cual brinda resultados para la corrección de la dicción.

**Palabra(s) Clave(s):** Dicción, GUI, Interfaz didáctica, Reconocimiento Automático de Voz.

## 1. Introducción

El ser humano ha desarrollado la capacidad de comunicación dada su necesidad de vivir en sociedad. Gracias a la generación de sonidos articulados, la comunicación oral substituyó a la mayoría de las técnicas primitivas. Sin embargo, la buena comunicación, independientemente del idioma, debe ser clara, objetiva y expresiva con el fin de que lo que se quiere expresar sea lo que el oyente entienda [6].

Hace algunas décadas se pensaba que educar la voz era asunto de los comentaristas, locutores, reporteros, entre otros. Hoy en día, sin embargo, no se puede dejar este asunto para aquellas áreas antes mencionadas sino que cualquier persona necesita hablar un lenguaje correcto, claro y natural.

Por otro lado, la información que se transmite a través de la voz posee características que pueden ser analizadas por medio de sistemas enfocados en reconocimiento automático de voz [1, 2, 3, 4]. El reconocimiento de voz es una rama de la investigación multidisciplinaria que ha logrado dar solución a diversas problemáticas del mundo real (desde aplicaciones en telefonía, hasta sistemas de ayuda para personas con discapacidades físicas o en rehabilitación [5]). Específicamente el reconocimiento de voz es de nuestro especial interés dado que mediante este podemos lograr, una vez extraída la información por algún método,

reconocer palabras con algún margen de error para después utilizarla en algún proceso.

La señal de voz es una señal de tipo aleatoria por lo que es necesario utilizar algún método que sea capaz de tomar en cuenta esta característica. Los Modelos Ocultos de Markov (Hidden Markov Models - HMM) son una de las herramientas estocásticas que han demostrado tener un buen desempeño en tareas de reconocimiento de voz. En este sentido, para lograr el reconocimiento de una palabra en específico, es necesario contar con repeticiones de la misma palabra (corpus de voces) y con esa información, mediante Modelos Ocultos de Markov, crear un modelo específico para dicha palabra. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que en las repeticiones de voz existen variaciones inter e intra-locutor aunado a otros factores (duración, velocidad, etc.). Dado que la información que utilizan los Modelos Ocultos de Markov son esas repeticiones, es necesario tomar en cuenta que estas influyen directamente en la calidad del modelo desarrollado para cada palabra a reconocer.

Esta investigación plantea el desarrollo de un prototipo didáctico para realizar pruebas de dicción de palabras aisladas en el idioma español. Para ello se estableció el vocabulario a identificar, la creación de un corpus de voz adecuado para el idioma español, el pre-procesamiento y extracción de características (tomando para este último a la energía como parámetro). Además se propusieron 3 esquemas diferentes de reconocimiento basados en Modelos Ocultos de Markov las cuales son Modelos Ocultos de Markov con DTW (MDTW), Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximado por izquierda y derecha (MID), y Modelos Ocultos de Markov con relleno de palabras (MRP). Con la estructura de los algoritmos presentados, se logró distinguir entre calidades de dicción contando con una eficiencia de reconocimiento por encima del 90 % (para cualquiera de las técnicas utilizadas). Finalmente se programó una interfaz en Matlab la cual brinda resultados para la corrección de la dicción.

El artículo se organiza de la siguiente manera. La sección 2 se enfoca en algunos fundamentos sobre la dicción y las unidades fonéticas. En la sección 3 se presentan las técnicas de reconocimiento de voz fundamento para esta

investigación (HMM y DTW). En la sección 4 se explican brevemente los métodos propuestos. La sección 5 presenta una explicación del prototipo desarrollado. Finalmente en la sección 6, se presentan algunas conclusiones.

## 2. Estructura del habla

### Fonemas

El conjunto de fonemas (cada uno de los sonidos simples del lenguaje hablado) en combinaciones diferentes, forman las palabras propias de un idioma y la base de la comunicación oral. De tal forma que cada idioma posee un conjunto propio de fonemas (por ejemplo, para el español 24, para el inglés cerca de 42 y para el francés casi 50 fonemas). Para el caso del idioma español la subdivisión de los fonemas es la siguiente [6]:

- **Timbres Básicos:** son variaciones del sonido producido naturalmente por las cuerdas vocales. Para el caso del idioma español: /a/, /e/, /i/, /o/ y /u/.
- La correcta producción de dichos fonemas (sin esfuerzo y con naturalidad) es el material de estudio en la impostación de la voz.
- **Sonidos auxiliares:** Se producen por el aparato resonador sin intervención de las cuerdas vocales. Corresponden a las consonantes sonoras: /m/, /n/, /l/, /s/, /j/, /r/.
- **Ataques:** Son modos de iniciar un timbre básico o un sonido auxiliar; representan las distintas formas de la oclusión que impide al aire fluir. Según la brusquedad de la liberación de aire, los ataques se dividen en:
  - ✓ Fuertes: /t/, /k/.
  - ✓ Suaves: /b/, /p/, /d/.
  - ✓ Mixtos: Como caso particular de ataques, los sonidos mixtos, se refiere a la sucesión de sonidos auxiliares /l/ o /n/ y el timbre básico /i/ (/ll/ y "/ñ/"); o las combinaciones /k/ con /s/ (/x/).

Es necesario conocer las reglas de cada idioma para formar combinaciones entre fonemas.

## **Dicción y fonación**

La dicción, como tema central de la investigación, se refiere a la correcta producción de los fonemas y la combinación con los timbres básicos. En otras palabras, es la forma de emplear palabras de forma correcta y acertada en el idioma al que pertenecen sin poner especial interés en lo que estas quieren expresar. Para lograr tener una dicción excelente es fundamental poseer una pronunciación correcta y matizar los sonidos respetando las pausas que sean necesarias.

La dicción, buena o mala, no tiene que ver con el significado que se desea transmitir ni con aquello que se pretende expresar. Cuando se posee una manera clara de hablar y resulta fácil entender a quien se expresa, se habla de una dicción clara o limpia.

Contrario a la buena dicción se encuentran los vicios del lenguaje o defectos en el habla. Sobre este punto, es necesario aclarar que la dicción no está precisamente vinculada al entendimiento; algunas palabras que no poseen buena dicción aun así son reconocibles pero no es tan sencillo de entender como aquellas que poseen buena dicción. Ejemplo de ellas son el utilizar "veniste" en vez de "viniste"; o "andabanos" en vez de "andábamos".

Se puede lograr una dicción correcta y por ende un habla clara, pronunciando cada palabra y sílaba de forma adecuada con el fin de incrementar la memoria muscular en base a repeticiones. Para mejorar la dicción es necesario también tomar en cuenta la velocidad a la que son emitidas las palabras por lo que, se recomienda una velocidad pausada con el fin de prestar atención a cada parte de la estructura del mensaje oral que se desea transmitir; la rapidez excesiva puede generar problemas en la comunicación. Esto no debe ser un sinónimo de monotonía y aburrimiento sino una mejoría en la voz y el ritmo.

Para poder poseer una buena fonación es indispensable poseer las siguientes características [6]:

- Suficiente: Mediante el dominio de la respiración.
- Clara: Correcta producción de cada uno de los sonidos que forman el idioma (aislada o en combinaciones); es decir, con dicción.

- Expresiva: En entonación, ritmo, intensidad y timbrado para poder captar no solo el significado propio de la palabra pronunciada sino el significado explícito dado por la entonación, velocidad y pausas.

Existen dos ramas de estudio muy importantes dentro de la teoría de producción de voz: Impostación y Dicción. En lo que se refiere al término conocido como “impostación de la voz” se refiere al aprovechamiento de la espiración (expulsión de aire por los pulmones) para producir sonido con el máximo rendimiento y el mínimo esfuerzo en la garganta.

Tal como lo indica la teoría, se necesita que el aire expulsado por los pulmones sea totalmente puesto en vibración por las cuerdas vocales; y éstas a su vez vibren por la acción del aire y la tensión propia que poseen; y una vez cumplidas estas condiciones, el aire se aproveche en el aparato resonador de forma conveniente. Sin embargo, algunos de los hábitos adquiridos hacen que la capacidad fonadora presente obstáculos en algunas de las etapas descritas.

En conclusión, para poseer una buena dicción es necesario pronunciar correctamente, acentuar adecuadamente y poseer buena velocidad. Es por ello que, es necesario el desarrollo de un método capaz de tomar en cuenta estas tres características y con ello determinar si se tiene una excelente, buena o mala dicción.

### 3. Técnicas de reconocimiento de voz

Para la presente investigación se utilizaron las siguientes técnicas de reconocimiento:

**Modelos Ocultos de Markov (HMM):** La aproximación de patrones no modela estadísticamente a las señales de voz por lo que posee ciertas restricciones. Por otro lado, las técnicas estadísticas han sido aplicadas en el agrupamiento para crear patrones de referencia. Mediante ello se mejora la clasificación y se realiza una simplificación dado que se utilizan múltiples señales de referencia y se caracterizan mejor las variaciones de diferentes pronunciaciones. Una de las herramientas que permiten caracterizar estadísticamente las propiedades de un

patrón o señal de voz son los Modelos Ocultos de Markov (MOM ó HMM). Un modelo oculto de Markov está caracterizado por [7,8]:

- El número de estados en un modelo (N).
- El número de símbolos distintos de observación en cada estado (M).
- La matriz de probabilidad de transición de estados ( $A = [a_{ij}]$ ).
- La distribución de probabilidad de los símbolos en el estado ( $B = [b_j(k)]$ ).
- La distribución de probabilidad inicial de estados ( $\pi = [\pi_i]$ ).

De manera simplificada un HMM puede ser expresado en ecuación 1.

$$\lambda = (A, B, \pi) \quad (1)$$

En la ecuación 1,  $\lambda$  es el nombre de un modelo particular o palabra específica a identificar.

En la aplicación de un HMM es necesario asumir que la señal de voz es en su naturaleza una señal aleatoria y cuyos parámetros pueden ser estimados. Es por ello que los HMM son una herramienta de gran utilidad para tareas diversas en reconocimiento de voz. Para aplicar un HMM son necesarias dos etapas:

- Entrenamiento: Creación de los modelos por palabra a reconocer.
- Prueba: Reconocimiento de la palabra con los modelos previamente entrenados. Es decir, obtención de la probabilidad de que la repetición a identificar haya sido generada por un modelo de palabra entrenada específico.

**Alineamiento Dinámico en el Tiempo (DTW):** Debido a que las palabras a reconocer, y por tanto la información extraída, posee variaciones (escalares, temporales, entre otras), la comparación entre muestras resulta un tanto complicada. Es por ello que es de gran utilidad realizar un alineamiento acústico temporal para disminuir estas variaciones.

El proceso anterior se puede llevar a cabo mediante el Alineamiento Dinámico en el Tiempo (DTW) [9]. Este método busca un empate entre muestras de dos diferentes repeticiones vocales de la misma palabra (buscando causar el mínimo desajuste en las repeticiones).

Lo que se busca es por tanto, una ruta óptima de empate entre muestras. El "algoritmo de programación dinámica" permite obtener la ruta óptima sin tener que obtener todas las rutas posibles. El alineamiento se realiza minimizando localmente la distancia entre muestras. La distancia acumulada se obtiene mediante ecuaciones 2 y 3.

$$D(n, m) = d(n, m) + \min[D(n-1, m)g(n-1, m), D(n-1, m-1), D(n-1, m-2)] \quad (2)$$

$$g(n, m) = \begin{cases} 1, & \text{para } w(n) \neq w(n-1) \\ \infty, & \text{para } w(n) = w(n-1) \end{cases} \quad (3)$$

En donde  $d(n, m)$  es la distorsión en tiempo y  $w(.)$  es la función de alineamiento entre  $n$  y  $m$  muestras.

#### 4. Métodos propuestos

Como se describió anteriormente, los Modelos Ocultos de Markov son de gran utilidad cuando se trabaja con información estocástica (como la contenida cuando se analiza la señal de voz). Una vez que se han analizado algunas de las metodologías comúnmente utilizadas para el reconocimiento de voz, de entre dicha variabilidad, se proponen varios algoritmos enfocados en la realización de pruebas de dicción.

Dada la capacidad que poseen los HMM para trabajar con estados, es que se pretende buscar un método capaz de generar dichos estados para ser posteriormente tratados. Sin embargo, si las repeticiones de voz (que producen dicho los estados) con las que trabajan los HMM varían en cuanto a velocidad y duración, es necesario utilizar una técnica que pueda disminuir el efecto que producen estas variaciones. Tomando en cuenta lo anterior, para la investigación presente, se utilizaron Modelos Ocultos de Markov junto con algunas modificaciones las cuales son: Modelos Ocultos de Markov con DTW, Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximado por izquierda y derecha y Modelos Ocultos de Markov con relleno de palabras.

## Modelos Ocultos de Markov con DTW (MDTW)

Basado en que algunas investigaciones recientes que han utilizado mezclas entre DTW y HMM han mostrado buenos porcentajes en tareas de reconocimiento de voz, [se propone alinear temporalmente los eventos acústicos (repeticiones) antes de crear los modelos por palabras [10]. El diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la figura 1.

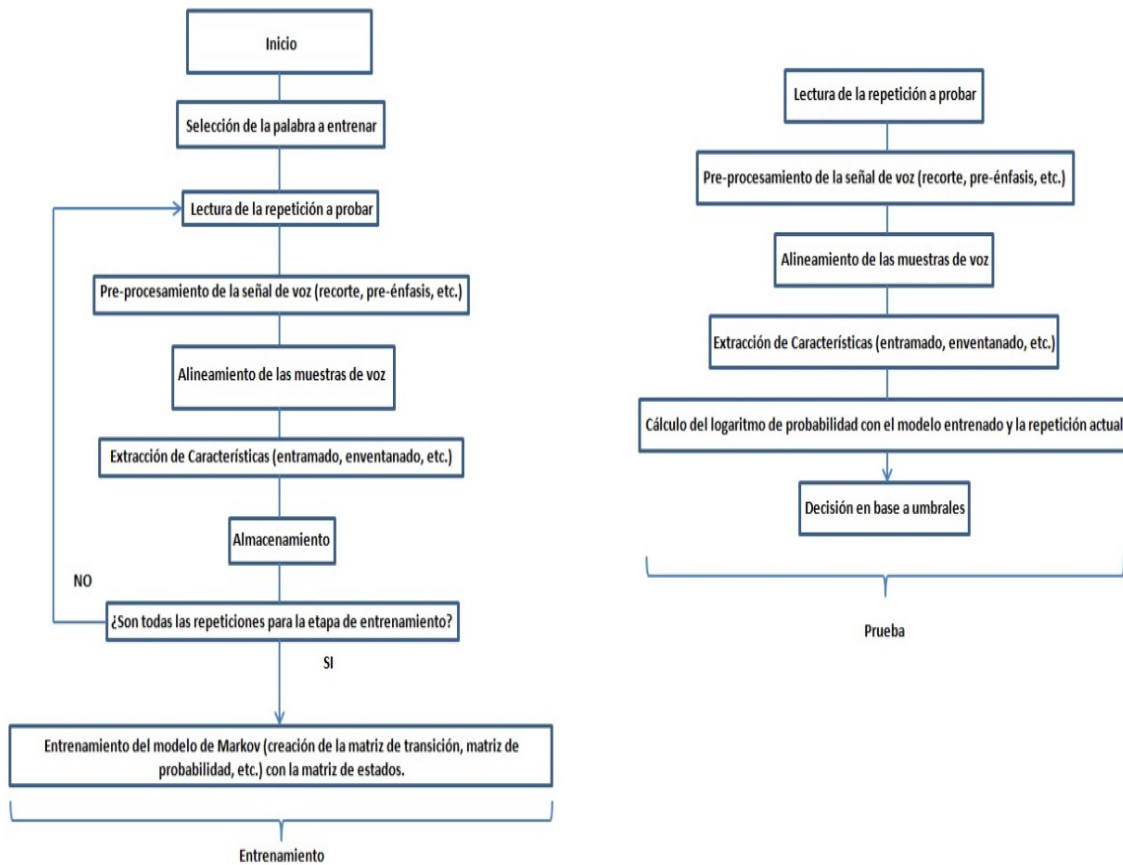


Figura 1 Diagrama de flujo para MDTW.

Este proceso de alineamiento se explica como sigue: Una vez que la señal es tratada por la fase de procesamiento (mediante el recorte, pre-énfasis, segmentación, etc.) la señal de voz  $X = x_1, x_2, \dots, x_N$  posee variabilidad respecto de la señal  $Y = y_1, y_2, \dots, y_M$ , la cual se presupone posee “buena dicción” y respecto de la cual se desea hacer el alineamiento. Debido a que generalmente los subíndices  $N$  y  $M$  no son iguales, es necesario encontrar una función que



relacione la distorsión entre muestras. Esta función se expresa en ecuación 4.

$$D(x, y) = \sum_{n=1}^N d(n, m) \quad (4)$$

Una vez se encuentra la función de distorsión y se realiza el Alineamiento Dinámico, se procede (como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 1) a la extracción de características y se continúa con el proceso de entrenamiento y prueba.

Este alineamiento permite que las matrices de características con las que se entrenan los HMM sean cuadradas (mismo número de características para todas las señales en entrenamiento de la misma palabra).

### **Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximado por izquierda y derecha (MID)**

Algunas de las palabras del vocabulario a reconocer pueden poseer similitudes fonéticas (como en el caso entre las palabras “veinti-uno” y “veinti-dos”, o entre “carro-za y “carro-cería” por poner algunos ejemplos). Tomando en cuenta estas similitudes, el método propuesto considera que la señal de voz puede ser dividida en dos sub-unidades fonéticas (como el caso utilizado en domótica para el reconocimiento de palabras continuas [11]).

El método de Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximado por izquierda y derecha (MID) consiste en, procesada y alineada la señal de voz  $\mathbf{X} = x_1, x_2, \dots, x_N$  como en el método anterior, dividir la señal en dos sub-unidades fonéticas y tratar a cada una por separado para las etapas de entrenamiento. Esto resulta en la creación de dos modelos por palabra bajo entrenamiento, ecuaciones 5 y 6.

$$\lambda_1 = (A, B, \pi) \dots \dots \dots \text{Modelo parte izquierda} \quad (5)$$

$$\lambda_2 = (A, B, \pi) \dots \dots \dots \text{Modelo parte derecha} \quad (6)$$

Una vez se almacenan los modelos entrenados, a la señal bajo identificación  $\mathbf{Z} = z_1, z_2, \dots, z_N$ , se le aplica el mismo proceso de Alineamiento Dinámico y división en 2 unidades fonéticas. Finalmente, el reconocimiento se lleva a cabo obteniendo la probabilidad del modelo entrenado de la parte izquierda y derecha de la palabra

entrenada respecto de la parte izquierda y derecha de la señal bajo reconocimiento. El diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la figura 2.

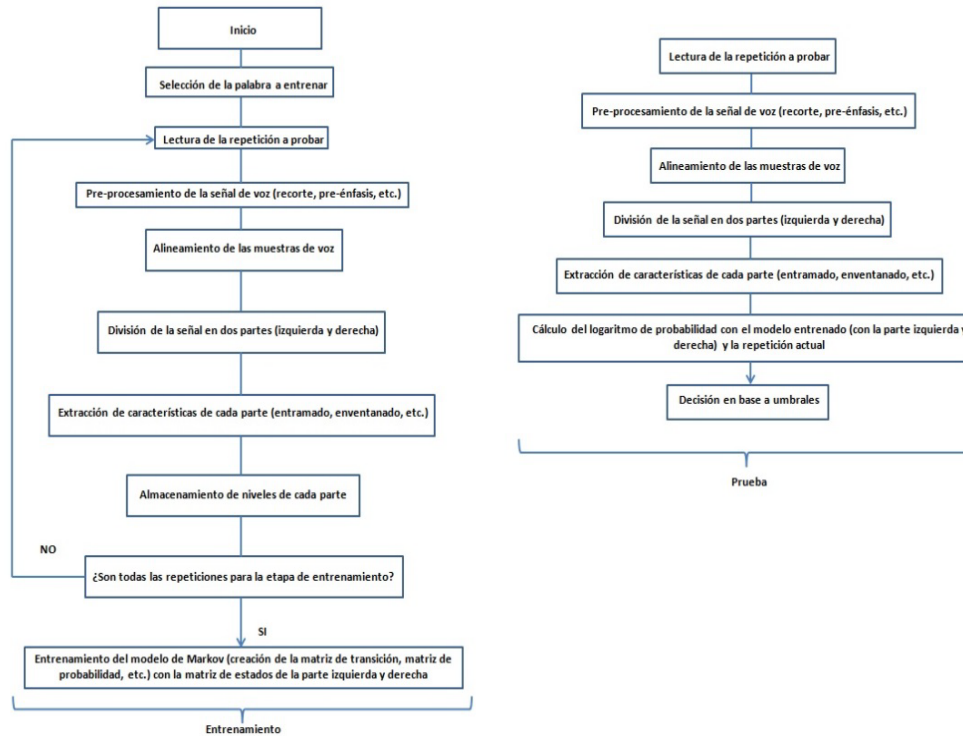


Figura 2 Diagrama de flujo para MID.

### Modelos Ocultos de Markov con relleno de palabras (MRP)

El Alineamiento Dinámico en el tiempo (DTW), en mayor o menor medida, modifica la información acústica presente en cada repetición alineada. Una forma de disminuir este efecto y asegurar el mismo número de muestras para todas las señales en entrenamiento es crear la matriz de características ajustando cada repetición al tamaño más grande de las muestras.

Supongamos que se tiene almacenado un vector  $V = v_1, v_2, \dots, v_N$  que corresponde al bloque de N parámetros de características de la palabra “ferrocarril”. Al extraer las características de otra de las repeticiones de la misma palabra se obtiene un vector característico  $B = v_1, v_2, \dots, v_M$  que corresponde a M parámetros de características de la palabra “ferrocarril”.

En esta situación se presentan 3 casos diferentes:

- Cuando  $M$  es más pequeña que  $N$ , se “rellena” el vector característico  $\mathbf{B} = v_1, v_2, \dots, v_M$  al tamaño de  $\mathbf{V} = v_1, v_2, \dots, v_N$ .
- Cuando  $M$  es más grande que  $N$ , se “rellena” el(los) vector(es) previamente almacenado de tamaño  $N$  al tamaño de  $\mathbf{B} = v_1, v_2, \dots, v_M$ .
- En el caso particular (ideal) cuando las muestras  $M$  y  $N$  sean del mismo tamaño, entonces el vector  $\mathbf{B} = v_1, v_2, \dots, v_M$  se almacena tal cual sin sufrir ningún ajuste. El diagrama de flujo de este algoritmo se muestra en la figura 3.

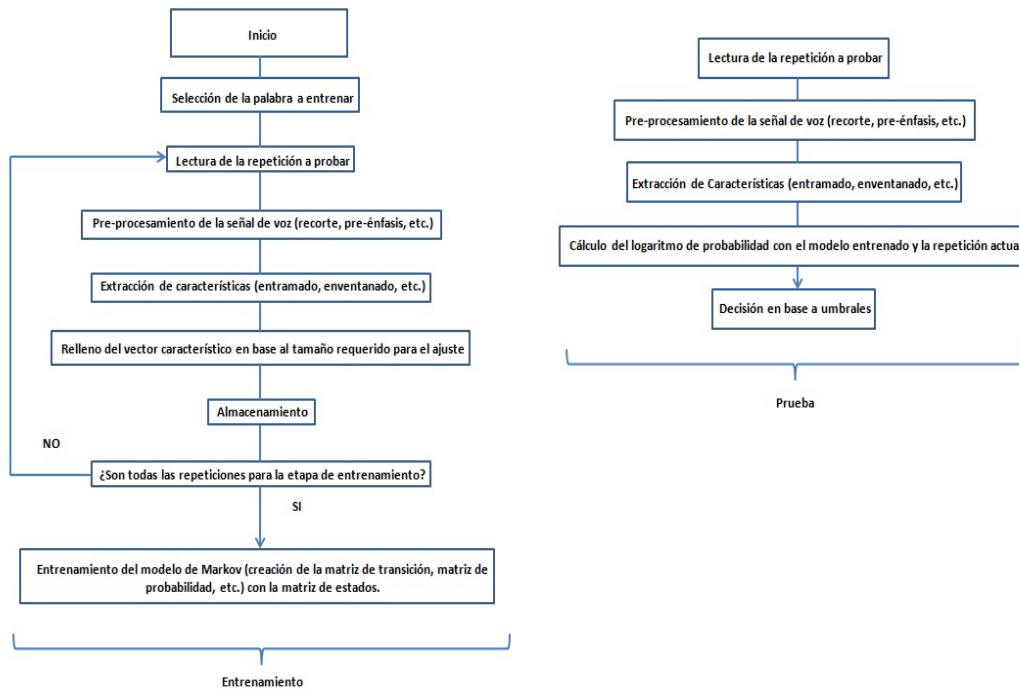


Figura 3 Diagrama de flujo para MRP.

## 5. Prototipo desarrollado

Una vez que se cuenta con los algoritmos, es necesario determinar la lista de palabras a identificar, la realización de pruebas con cada una de ellas y, con base en ello, desarrollar una interfaz apropiada para la realización de pruebas de dicción. En la tabla 1, se indican la lista de palabras seleccionadas y el método que mejor resultados brindó para cada una de ellas (palabras que según una

encuesta, son algunas de las más difíciles de pronunciar en el idioma español [12]).

Tabla 1 Métodos de identificación por palabras.

<b>Palabra</b>	<b>Método</b>
Helicóptero	MDTW
Ineptitud	MRP
Madrid	MRP
Prejuicios	MDTW
Albóndiga	MRP
Indecisión	MID

Es así que, según la palabra a identificar, es el método que la interfaz utiliza para su reconocimiento. Dado que el objetivo es el desarrollo de una interfaz prototipo para probar la dicción de un hablante común, es necesario omitir parámetros como la elección de método de reconocimiento, gráficas de información frecuencial o algunos otros que, para el hablante común, no son de mucha utilidad. Debido a que los algoritmos de reconocimiento desarrollados para la presente investigación se programaron en MATLAB 2011, se optó por desarrollar el prototipo en el entorno gráfico (GUI) de MATLAB. Tanto para la etapa de prueba como de entrenamiento de Modelos Ocultos de Markov, se utilizó una herramienta desarrollada por Kevin Murphy llamada Hidden Markov Model (HMM) Toolbox, la cual es una librería especial para Matlab que se puede encontrar de forma gratuita en línea [13].

Es por ello que, para poder utilizar la interfaz desarrollada, es necesario pre-cargar algunos archivos especiales (descargable del sitio web). La lista de archivos necesarios son HMM, KPMstats, KPMtools y netlab3.3. La estructura de la interfaz desarrollada mediante el GUIDE se describe en secciones siguientes, ejemplificando su uso.

### **Menú principal**

En la figura 4 se muestra la interfaz inicial del programa desarrollado. En ella se tiene como elementos los botones:

- Iniciar: Abre la interfaz para la realización de nuevas pruebas de dicción.

- Ejemplos: Abre una interfaz con algunas dicciones de prueba.
- Salir.



Figura 4 Menú principal.

## Ejemplos

Si se desea aprender cómo funciona la interfaz para las pruebas de dicción, es necesario presionar el botón con la etiqueta “Ejemplos” (ver figura 5).

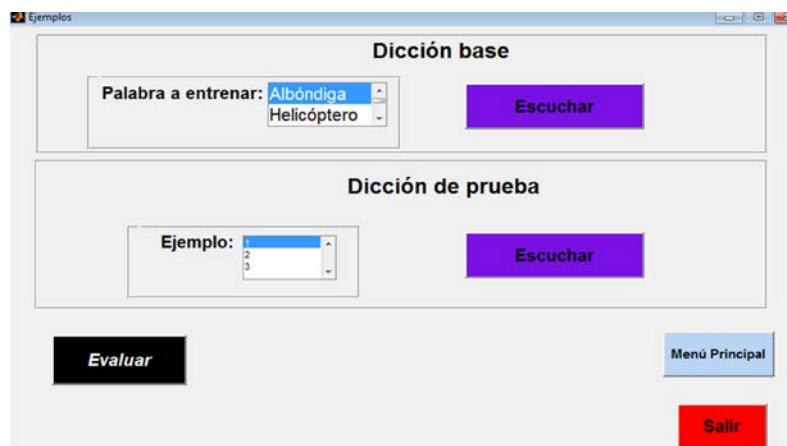


Figura 5 Sub menú “ejemplos”.

Dado que lo primero que se necesita para probar la dicción es conocer la dicción “esperada” (correcta), es necesario definir, de entre la lista de palabras posibles (vocabulario predefinido), aquella que se desea probar. Esto se lleva a cabo seleccionando de la lista “Palabra a entrenar” la palabra elegida y presionando el botón “Escuchar” de la sección “Dicción base”.

Algo a destacar es que estas repeticiones de palabras base (repeticiones con dicción correcta) fueron adquiridas (tanto para la prueba de los algoritmos como para el desarrollo de la estructura gráfica) de hablantes estudiantes de la licenciatura en comunicaciones de la Universidad Autónoma de Baja California, cuya dicción puede ser clasificada como “correcta” gracias a su preparación profesional. Dichas grabaciones fueron obtenidas en una cabina especial para video conferencias del Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (CITEDI - IPN).

Una vez conocido que se conoce la dicción “correcta”, en la sección “Dicción de prueba” se pueden probar algunas dicciones ejemplo (3 por cada palabra) y conocer el resultado obtenido en base a la dicción encontrada. Para llevar a cabo este proceso es necesario elegirlos de la lista “Ejemplo” y presionar el botón “Escuchar”. Para conocer la calificación presente en el ejemplo de la palabra seleccionada, es necesario presionar el botón “Evaluar”. En la figura 6 se muestra un ejemplo del resultado obtenido.

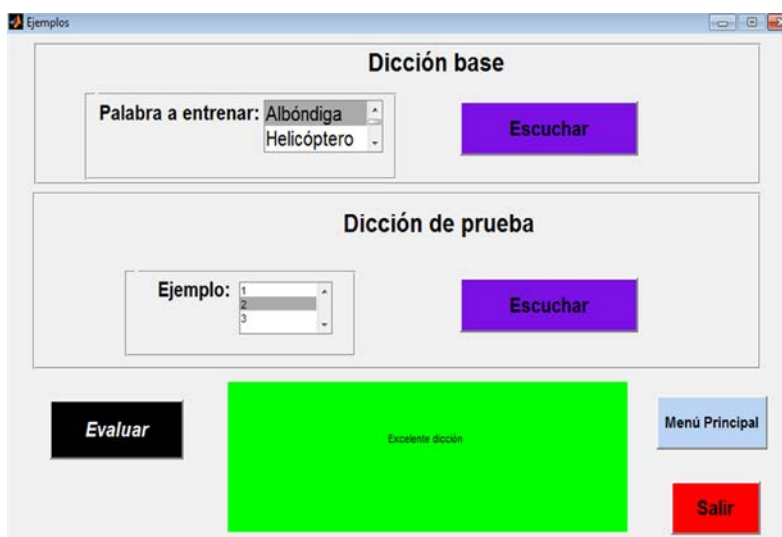


Figura 6 Ejemplo propuesto de la prueba de dicción de la palabra “albóndiga”.

El proceso de calificación de dicción se programó con base al despliegue de 3 colores diferentes:

- Color verde: Excelente dicción,
- Color Amarillo: Buena dicción,

- Color Rojo: Mala dicción.

Un aspecto fundamental a destacar es que esta relación de colores es proporcional al reconocimiento realizado mediante los algoritmos propuestos. Esto se debe a que, los valores obtenidos en el reconocimiento (ver tabla 2) son valores probabilísticos los cuales, es necesario relacionar con estructuras fáciles de entender para cualquier persona que desea probar su dicción.

Tabla 2 Decisión con base a probabilidad y umbrales.

Técnica utilizada	Excelente dicción	Buena dicción	Mala dicción
<b>MID</b>	Loglik <100	Loglik entre 100 y 150	Loglik >150
<b>MRP</b>	Loglik <150	Loglik entre 150 y 300	Loglik >300
<b>MDTW</b>	Loglik <150	Loglik entre 150 y 300	Loglik >300

## Iniciar

En la figura 7, el botón “Iniciar” del menú principal, es utilizado para probar nuevas repeticiones de voz. El proceso para seleccionar y escuchar la dicción base es similar a la descrita en la fase de pruebas.

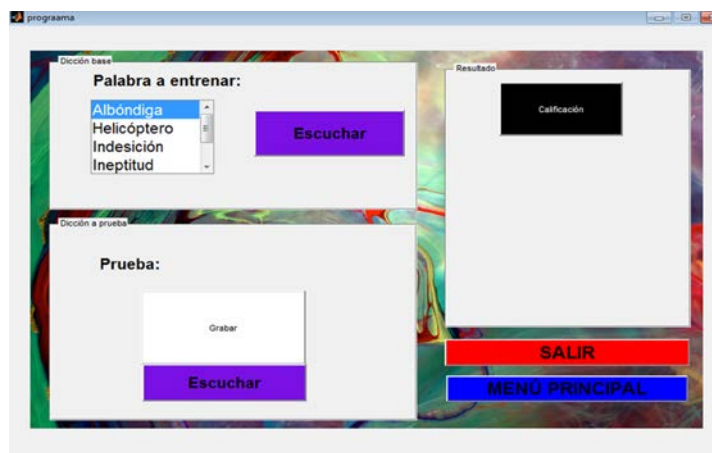


Figura 7 Sub menú “iniciar”.

A diferencia de la interfaz desarrollada mostrada en figuras 5 y 7 se puede grabar y escuchar (mediante el botón correspondiente) la repetición de la palabra a probar con la finalidad de corregirla (si es que la grabación a probar no fue acústicamente satisfactoria).

Finalmente, al igual que el submenú de “opciones”, mediante el botón “Calificación”, se obtiene el resultado de la dicción encontrada.

## **6. Conclusiones**

El prototipo presentado tiene la finalidad de ser aplicado para la realización de pruebas de dicción en el idioma español. Debido a este enfoque es que se utilizaron diversas técnicas y parámetros para calificar, de un vocabulario definido, repeticiones de voz con diferentes dicciones.

Específicamente para esta investigación, se utilizaron Modelos Ocultos de Markov junto con algunas modificaciones (Modelos Ocultos de Markov con DTW (MDTW), Modelos Ocultos de Markov con DTW aproximados por izquierda y derecha (MID) y Modelos Ocultos de Markov con relleno de palabras (MRP)).

El conjunto de algoritmos integrados en la interfaz final posee la flexibilidad suficiente para ampliar la cantidad de palabras de prueba de dicción y, más aún, creemos que se pueden ampliar las pruebas de dicción a otros idiomas modificando el corpus de voces al idioma que se deseé.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] A. Pedroza, J. de la Rosa, “El invisible y asombroso proceso de la comunicación oral: bases sobre reconocimiento de voz”. *Pistas Educativas*. No. 112. Noviembre 2015. Pp. 1310-1330.
- [2] B. Plínio, "On the Defense of von Kempelen as the Predecessor of Experimental Phonetics and Speech Synthesis Research". *The Ninth International Conference on the History of the Language Sciences*. 2007. Pp. 101-106.
- [3] E. David, O. Selfridge, "Eyes and Ears for Computers". *Proceedings of the IEEE*. Vol.50. Mayo 1962. Pp. 1093-1101.
- [4] B. Gold, N. Morgan, D. Ellis, *Speech and audio signal processing: Processing and Perception of Speech and Music*. 2da. Edición. 2011. Editorial WILEY. 688 páginas.



- [5] C. Seelbach, "A perspective on early commercial applications of voice-processing technology for telecommunications and aids for handicapped". *Human-Machine Communication by Voice*. 1993. Pp. 9989-9990.
- [6] C. Caballero, *Cómo educar la voz hablada y cantada*. 8va. Edición. 1994. Editorial EDAMEX. 257 páginas.
- [7] L. Beltrán, *Simulación de modelos ocultos de Markov aplicados al reconocimiento de palabras aisladas, utilizando el programa Matlab*. Tesis de Licenciatura. Escuela Politécnica Nacional: Escuela de Ingeniería. Quito. 2003.
- [8] L. Rabiner, "A tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition". *Proceedings of the IEEE*. Vol. 77. No. 2. Febrero de 1989. Pp. 257-286.
- [9] H. Silva, *Reconocimiento Automático de locutor y realización de un sistema experimental*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 1994.
- [10] S. Prasad, T. Kishore, "Hybrid HMM/DTW based Speech Recognition with Kernel Adaptive Filtering Method". *International Journal on Computational Sciences & Applications (IJCSA)*. Vol.1. No.4. Febrero de 2014. Pp. 11-21.
- [11] *Reconocimiento de voz para la aplicación en domótica*. Universidad Tecnológica Nacional: Facultad Regional San Nicolás. 2008.
- [12] CRIBEO. [http://www.cribeo.com/ocio\\_y\\_cultura/1004/](http://www.cribeo.com/ocio_y_cultura/1004/)"las-10-palabras-mas-del-espanol. Junio de 2014.
- [13] K. Murphy, *Hidden Markov Model (HMM) Toolbox for Matlab [Algoritmo Computacional]*. <http://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Software/HMM/hmm.html>. Mayo de 2015.

## **8. Autores**

M.C. Ángel David Pedroza Ramírez obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la ingeniería por la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2015. Actualmente se encuentra cursando el segundo semestre del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Procesamiento de Señales y Mecatrónica en la

misma institución. Su línea de investigación actual es en reconocimiento de voz así como identificación automática enfocada en bioacústica.

Ph.D. José Ismael de la Rosa Vargas obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Procesamiento de Señales y Control (noviembre de 2002), por parte de la Universidad Paris Sud (XI) y de la Escuela Superior de Electricidad (SUPELEC) al sur de Paris (Gif-sur-Yvette), Francia. Trabaja actualmente en procesamiento de imágenes y voz, métodos estocásticos en problemas inversos e instrumentación.

M. en C. Ernesto García Domínguez obtuvo el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Electrónica y Telecomunicaciones (área de Instrumentación) en julio de 1993 por parte del Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en Baja California.

Ph.D. Hamurabi Gamboa Rosales obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica en el área de Procesamiento de Señales en 2009, en el Institute of Acoustics and Speech Communication de la Universidad Tecnológica de Dresden, Alemania.

M.C. Aldonso Becerra Sánchez obtuvo el grado de Maestro con orientación en Computación, de la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2007. Actualmente se encuentra estudiando el Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la misma Institución, además de ser docente en dicha Facultad.

# ESCUCHANDO A LA NATURALEZA: DEL RECONOCIMIENTO DE VOZ A LA BIOACÚSTICA

***Ángel David Pedroza Ramírez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
P.A.D\_16@hotmail.com

***José Ismael de la Rosa Vargas***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica  
joseismaelrv@gmail.com, ismaelrv@ieee.org

***Rogelio Rosas Valdez***

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias Biológica  
rogrosas@gmail.com

## Resumen

La bioacústica es la rama de la ciencia que, mediante información acústica, se encarga del estudio de la forma de transmisión y recepción de información biológica con el fin de alcanzar desde la identificación de especies hasta la determinación de la salud de un ecosistema. Algunos desarrollos recientes se han enfocado en la adecuación y aplicación de técnicas de reconocimiento de voz tales como el uso de Modelos Ocultos de Markov, Redes Neuronales, entre otros; con el fin de lograr el reconocimiento automatizado de especies. En esta revisión se presentan algunos avances tecnológicos en el área así como una visión global sobre las herramientas matemáticas disponibles para, mediante ellas, lograr algunos de los objetivos que la bioacústica pretende alcanzar.

**Palabra(s) Clave(s):** Bioacústica, Biología, Identificación de especies, Reconocimiento Automático de Voz.

## 1. Introducción

La Bioacústica es la ciencia en donde confluyen la biología y la acústica para investigar de forma no invasiva la producción y recepción del sonido biológico, así

como los métodos para la transmisión de información por medio de la acústica y su respectiva propagación en el medio. En esta área de estudio se relacionan otras como la biología, taxonomía, sistemática, ecología del paisaje sonoro, computación y electrónica.

Esta ciencia provee de técnicas de bajo costo para el monitoreo de la biodiversidad de áreas remotas [1]. Algunos de los estudios más comunes se enfocan en la identificación de especies tales como murciélagos, ballenas, delfines, insectos, aves y anfibios [2]. Así como también en la determinación de la actividad biológica del fondo marino [3].

El continuo desarrollo, ha permitido crear estudios más avanzados sobre la población de aves (censos) y sobre la forma de prevenir la reducción de poblaciones del hábitat silvestre por actividad antropogénica (todo ello sin perturbar el ecosistema). El avance implica por tanto monitoreo de población, estimación de abundancia, riqueza y demografía así como la identificación de especies vulnerables o en riesgo de extinción, estudios taxonómicos, selección sexual y ecología del comportamiento [4].

Específicamente enfocado en el estudio de la conservación de las aves, México ocupa el décimo lugar a nivel mundial en riqueza de aves (según un estudio realizado en 2003) (figura 1). Esto coloca a México en el onceavo lugar entre los países mega diversos del mundo de acuerdo a su riqueza avifaunística (entre 1,123 y 1,150, y en el cuarto en cuanto a la proporción de especies endémicas, es decir entre 194 y 212 es el número de especies de aves que solo se encuentran en nuestro país [5]). En este sentido, las especies endémicas son las que poseen mayor importancia en la conservación; no obstante, entre 298 y 388 especies (26-33%) de la avifauna mexicana se encuentra en alguna categoría de amenaza de acuerdo a autoridades nacionales o internacionales [5,6]. Su extinción por tanto representa una pérdida global significativa.

La riqueza de especies endémicas en nuestro país se concentra en las zonas montañosas del eje Neo volcánico, la Sierra Madre Occidental y del Sur, y la Planicie Costera del Pacífico (figura 1).

En el año 1600 se extinguieron aproximadamente 103 especies de aves en el mundo (24 especies en los últimos 200 años en México). Una de cada 10 aves está en categoría de amenaza con lo cual se cree que para los próximos 100 años el 12% de la fauna mundial enfrentará riesgos (en México existen aproximadamente 40 especies amenazadas).

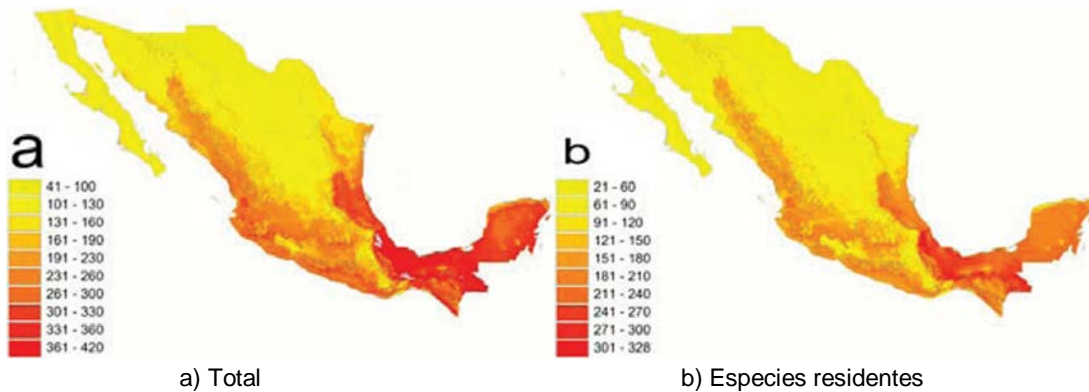


Figura 1 Distribución de riqueza potencial de aves en México [5].

El desarrollo continuo en el área de la bioacústica sigue siendo hoy promisorio “en teoría” [7]. Aunque existe más de una década de investigaciones en bioacústica, existen diversos enfoques para llevar a cabo la identificación debido a que la literatura concerniente se encuentra dispersa entre biología e ingeniería. A pesar de que existen avances tecnológicos para la aplicación en la conservación de especies, algunas de ellas resultan muy costosas tanto en espacio y tiempo (como el caso de la telemetría la cual es utilizada para el seguimiento de aves, seguimiento de rutas migratorias, resguardo de anidación, entre otros). Aunado a esto, aunque no existe un registro de la cantidad de investigadores dedicados al monitoreo y conservación de la biodiversidad, en México son escasos los estudios sobre sistemas que colecten e identifique cantos de manera automatizada creando un nicho de oportunidad para la creación de nuevas aplicaciones útiles para esta rama de la investigación [6].

El presente artículo tiene como objetivo principal el hacer una revisión sobre los avances tecnológicos así como la de brindar una visión global sobre las herramientas matemáticas disponibles para alcanzar algunos de los objetivos que

la bioacústica pretende alcanzar: lo cual es, desde el crear aplicaciones portables para teléfonos inteligentes (capaces de realizar la identificación de especies en tiempo real mediante la grabación, almacenamiento, identificación y geolocalización de vocalizaciones con el fin de ampliar las bases de información disponibles en los centros de investigación) hasta imágenes satelitales de monitoreo continuo para la recolección de información ambiental [8].

El artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta un resumen sobre los objetivos que la bioacústica pretende alcanzar. En la sección 3 se explica la estructura para el diseño de un reconocedor. En la sección 4 se presentan algunas de las herramientas matemáticas utilizadas en reconocimiento de voz. La sección 5 presenta algunos de los avances en materia de reconocimiento en bioacústica. Finalmente en la sección 6, se presentan algunas conclusiones.

## **2. Enfoques y aplicaciones en bioacústica**

En un inicio, las investigaciones enfocadas en la identificación de especies se realizaban por medio de inspección anatómica (observaciones en campo por un observador). Para realizar estas observaciones era necesario ver y capturar al espécimen para poder identificarlo por medio de una cámara (disponiendo siempre de una línea de vista, es decir sin obstrucción, entre el observador y el espécimen observado). Aunado a esto, el observador necesitaba contar con el camuflaje adecuado a una distancia considerable con el fin de no perturbar al entorno.

Como se puede notar para la identificación anterior, es necesario contar con la experiencia del investigador (para darle fiabilidad a la inspección). Algunos estudios se han centrado en probar la variabilidad que presentan los escuchas entrenados (bajo ciertas condiciones y para ciertas especies). En estos se pudo concluir que la mayoría de los escuchas entrenados solamente fallan en la identificación de aves poco comunes o raras [7]. Sin embargo, esto conlleva ciertas desventajas como la dispersión del conocimiento o el tiempo de adquisición para cubrir diferentes áreas de ecosistemas (con los cuál se hace necesario una mayor cantidad de observadores calificados) y por último, el posible sesgo

introducido por el observador al detectar, identificar y registrar las observaciones de un ecosistema.

Sin embargo, tras el nacimiento de la bioacústica como método de identificación de aves, algunas de las investigaciones, han optado por el utilizar las vocalizaciones de las aves como característica para lograr dicha tarea. Del avance en estos estudios, dentro de la bioacústica, se pueden identificar grandes áreas de aplicación, entre las cuales (algunas de ellas aún sin resolver de forma eficiente) se pueden identificar las siguientes [1]:

- **Identificación de especies en campo.** En la mayoría de las aves se ha podido identificar que son vocalmente más activas durante los periodos de reproducción. Esto hace posible la detección de aves aún a grandes distancias, con lo cual además de su identificación, se hace posible llegar a determinar el tamaño de población de especies (lo cual representa un método económico para estimar biodiversidad).

Ejemplo de la eficiencia de este método, es el mencionado sobre la identificación de 85% de las especies de aves mediante un registro de apenas 5 días realizado en el amazonas boliviano (el método de captura con redes requirió 54 días de campaña llevada a cabo por 7 ornitólogos).

- **Identificación de individuos, sexo y mapeo de territorios.** Para el caso de la identificación individual es necesario, dentro de la generalidad uniforme de sonidos, poder diferenciar matices de canto y por tanto, con base en esas diferencias, lograr una identificación individual (lo cual posibilitaría el conteo de animales de una especie por zonas).

Para poder diferenciar entre sexos en una población de una misma especie es necesario conocer diferencias específicas en los parámetros de canto. Los sistemas de identificación de sexos han de poder por tanto tomar en cuenta diferencias en características, las cuales van desde la frecuencia fundamental (relacionado con el tamaño de la siringe, órgano que permite la variación del canto en las aves), presencia de armónicos, entre otros.

En cuanto al mapeo de territorios, una vez que se llevó a cabo la identificación individual, se puede realizar mediante “perchas” (registros de

identificación) o por cambios de respuesta (parecidos a los de identificación de especies en campo) en diferentes posiciones geográficas.

- **Estimación de densidad absoluta y relativa.** En algunas condiciones será necesario el conocer la densidad absoluta de la población, sin embargo, el costo para llevar a cabo esta tarea resulta elevado (aunado a la variabilidad reducida presente en algunas ocasiones). La estimación de densidad absoluta se calcula mediante la detección de cada uno de los sujetos que están próximos al observador así como la distancia a la cual se encuentra cada uno de ellos respecto de esta referencia. Por otro lado, para llevar a cabo el índice relativo de la densidad, solo es necesaria que una misma proporción de individuos de la población sea registrada.

Aunque la segunda tarea puede parecer más sencilla que la primera, la detectabilidad de los sujetos (en este caso aves) no es siempre la misma y varía según sea el sexo, época del año, condición climática, hora del día, tipo de ambiente, entre otros. En este punto es posible estandarizar esta tarea tomando en cuenta solo los cantos presentes a cierta distancia del observador (por ejemplo los cantos detectados a menos de 50 metros) y evitando condiciones climatológicas extremas (viento y lluvia).

- **Estimación de la tasa de mortalidad.** La existencia de los machos a través del tiempo en un área, es un índice que permite estimar la tasa de mortalidad (para llevar a cabo esta identificación de machos se utilizaban tradicionalmente medios artificiales).

Esto solo es posible para aquellas especies cuya marca sea invariante a través del tiempo, es decir, siempre la misma a lo largo de toda la vida del sujeto estudiado.

- **Atracción y ahuyentamiento por playback .** La atracción por playback se puede aplicar en la marcación de individuos y para una captura selectiva (dado que la grabación es especie-específica). De esta forma las aves podrían ser atraídas hacia sitios seguros y por ende ayudar en la conservación de especies las cuales son atraídas por los parlantes.



Por su parte, en cuanto al ahuyentamiento, este método es utilizado cuando se requiere evitar en cierta área la presencia de aves. Este método es el sustituto de técnicas que implicaban barreras o métodos pirotécnicos. En su lugar, se producen sonidos naturales o de gran intensidad capaces de espantar a las aves y evitar así pérdidas económicas o posibles accidentes en áreas donde su presencia sería perjudicial. Para este último caso, es necesario tomar en cuenta la posible extinción de respuesta asociada al estímulo; por lo que será necesario cambiar de playback con frecuencia, aunque se recomienda la combinación de varios métodos para asegurar la efectividad del espantamiento.

### **3. Visión global y específica**

Con el fin de determinar el estado de un ecosistema se ha buscado diagnosticar a las especies en el hábitat, así como sus relaciones macro sistemáticas y densidades de población relativa, lo cual conlleva al desarrollo de herramientas tecnológicas que permitan lograr la identificación de las especies con el fin de crear sistemas más complejos lo más automatizados posibles [9, 10, 11].

La mayoría de las metodologías que se utilizan en el reconocimiento del habla son la base para el monitoreo bioacústico [12]. Sin embargo, algunas de las técnicas utilizadas en sistemas de reconocimiento automático (cuyo enfoque es la conversión de voz a texto) fallan en la capacidad de reconocimiento en ambientes naturales por lo que es necesario hacer uso de modificaciones a las técnicas avanzadas de reconocimiento para adaptarlas al reconocimiento en bioacústica (como el utilizado en [13]).

Los sistemas de reconocimiento de voz utilizados en la actualidad pueden variar en estructuras tan diversas como el diseñador lo desee [14]. Sin embargo, de entre la variabilidad existente, algunos son los procesos fundamentales que deben de poseer para poder ser considerados como sistemas de reconocimiento. Al respecto, se pueden considerar los siguientes procesos:

#### **Adquisición**

Para el caso del reconocimiento en bioacústica este proceso consiste entre otros, en la aplicación de filtros capaces de suprimir el ruido externo en las

grabaciones, así como del conocimiento especie-específica para realizar una segmentación y ventaneo apropiado.

### **Extracción de características**

Una vez que la señal de voz ha sido adecuada en el pre-procesamiento, la etapa siguiente corresponde a la extracción de la información contenida en la señal de voz. Esto se realiza con el fin de obtener una secuencia de vectores o parámetros que describan la información de interés contenida en la señal. Es necesario aclarar que entre más parámetros posean estos vectores, más difícil se vuelve su tratamiento e implementación.

A este proceso se le conoce como parametrización o caracterización y consiste en obtener las características propias o distintivas de la señal de voz en análisis con el fin de poder realizar de manera más sencilla las comparaciones necesarias para llevar a cabo el reconocimiento. Sin embargo, el método utilizado para llevar a cabo este proceso depende de la aplicación en que se busca aplicar el reconocimiento.

En el caso de la bioacústica, este parámetro es determinado según el tipo de reconocimiento que se lleva a cabo (llamados, cantos, etc.), lo cual está directamente relacionado con la especie-específica a identificar y qué parámetros considerar como característicos

### **Clasificación**

En esta etapa se lleva a cabo propiamente la identificación de la palabra (o sonido). Este proceso requiere de dos fases: entrenamiento y prueba (en este punto es posible utilizar los mismos métodos de reconocimiento del habla en bioacústica pero, como se mencionó anteriormente, con sus respectivas modificaciones).

## **4. Herramientas disponibles (visión general)**

De entre las principales técnicas aplicadas en reconocimiento de voz se tienen:

- **Cuantificación Vectorial (VQ).** El resultado de utilizar ya sea bancos de filtros, análisis LPC, etc., son vectores característicos que representan las

características espectrales variantes en el tiempo de acuerdo a la señal de voz. Denotaremos a los vectores espectrales como  $X_i$ , en donde típicamente cada vector es de una dimensión  $p$  (o al menos  $p$ ), ecuaciones 1.

$$\begin{aligned} X_1 &= A_0^1, A_1^1, A_2^1, \dots, A_p^1 \\ X_2 &= A_0^2, A_1^2, A_2^2, \dots, A_p^2 \\ &\vdots \\ X_L &= A_0^L, A_1^L, A_2^L, \dots, A_p^L \end{aligned} \quad (1)$$

La cuantificación vectorial es la generalización de la cuantificación escalar y en ella la cantidad total de información es tratada y almacenada en vectores los cuales representarán al total de información [15]. Entre las ventajas de la representación por Cuantificación Vectorial se encuentran el que se reduce el almacenamiento para el análisis de la información, el tiempo de cálculo para determinar los vectores de análisis espectral y que los cálculos de similitud son reducidos a solo una tabla de estimación. Por otro lado, entre las desventajas se encuentra el que se crea una distorsión espectral inherente en la representación del análisis del cada vector.

Se habla de un cuantificador óptimo cuando la distorsión promedio es mínima al cuantificar las secuencias de vectores. Para poder saber la eficiencia de un cuantificador es necesario conocer la distorsión promedio producida por dicho cuantificador, la cual se expresa como:

$$D = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L d(X_l, q(x-l)), \quad (2)$$

En donde  $D$  es la distorsión promedio y  $d( )$  es una medida de distorsión o distancia espectral.

- **Modelos Ocultos de Markov (HMM).** La aproximación de patrones no modela estadísticamente a las señales de voz por lo que posee ciertas restricciones. Por otro lado las técnicas estadísticas han sido aplicadas en el agrupamiento para crear patrones de referencia. Mediante ello se mejora

la clasificación de patrones y se realiza una simplificación dado que se utilizan múltiples señales de referencia y se caracterizan mejor las variaciones de diferentes pronunciaciones.

Una de las herramientas que permiten caracterizar estadísticamente las propiedades de un patrón o una señal de voz son los Modelos Ocultos de Markov (MOM ó HMM) [16,17]. Los HMM son considerados una extensión de las Cadenas Ocultas de Markov caso continuo o discreto de las Cadenas de Markov).

Para entender el proceso de las cadenas de evidentes de Markov, se considera como tal a una sucesión de pruebas a intervalos regulares de tiempo. Este proceso genera una sucesión de estados  $A_1, A_2, \dots, A_n$  llamado espacio de estados. En cada prueba ocurre un cambio de estado de acuerdo a un conjunto de probabilidad que se asocia a ese estado. Estos cambios ocurren en tiempos discretos  $t = 1, 2, 3, \dots, n$  y su estado asociado es denominado  $X_t$

Para aplicar un HMM, como se mencionó anteriormente, es necesario tomar en cuenta dos etapas: entrenamiento y prueba. Por otro lado, un modelo oculto de Markov está caracterizado por [18]:

- ✓ *El número de estados en un modelo (N):* En este sentido, a los estados individuales se les describe con la letra  $q$  en un determinado tiempo  $t$ .
- ✓ *El número de símbolos distintos de observación en cada estado (M):* Al respecto, al conjunto de observaciones se le denota como  $O = o_1, o_2, \dots, o_M$ , mientras que a los símbolos individuales se les denota como  $V = v_1, v_2, \dots, v_M$ .
- ✓ *La matriz de probabilidad de transición de estados ( $A = [a_{ij}]$ ):* Esta matriz expresa la probabilidad de pasar de un estado a otro. Es decir:

$$a_{ij} = P \left[ q_{t+1} = \frac{j}{q_t} = i \right] \quad (3)$$
$$1 \leq i \leq N$$

$$1 \leq j \leq N$$

- ✓ La distribución de probabilidad de los símbolos en el estado

( $B = [b_j(k)]$ ): Es decir:

$$b_j(k) = P \left[ O_t = \frac{v_k}{q_t} = j \right] \quad (4)$$

$$1 \leq k \leq M$$

- ✓ La distribución de probabilidad inicial de estados ( $\pi = [\pi_i]$ ): Este parámetro indica la probabilidad de iniciar en un estado cualquiera:

$$\pi_i = P[q_i = i] \quad (5)$$

$$1 \leq i \leq N$$

Con estos valores el HMM puede generar una secuencia de observaciones. De manera compacta se puede expresar como:

$$\lambda = (A, B, \pi) \quad (6)$$

- **Modelos de Mezcla de Gaussianas (GMM).** Para el caso de HMM continuos, las observaciones se modelan con PDFs que son una mezcla o combinación de funciones de densidad de probabilidad gaussianas [19]. El utilizar funciones de este tipo mejora el modelado estadístico del conjunto de vectores de observación que se pueden producir desde un estado cuando la dispersión de esos vectores es grande.

En el caso específico de los HMM continuos se calcula un vector de medias y de covarianza para cada una de las gaussianas de la mixtura de cada estado. Esto se logra conociendo el vector de observaciones correspondiente a la gaussiana de un estado específico. Experimentalmente esta técnica es adecuada para el reconocimiento del habla pero es necesario una gran cantidad de datos de entrenamiento (dada la cantidad de parámetros a entrenar) y utilizar un tiempo de ejecución significativamente mayor que con otros métodos.

- **Redes Neuronales.** Las redes neuronales (Neural Networks - NN) consisten en un gran número de unidades de cálculo simple, las cuales se encuentran altamente interconectados entre sí [20]. Ellas pretenden

interconectar un conjunto de unidades de proceso (o neuronas) en paralelo de forma similar a como lo hace el ser humano (obteniendo también prestaciones similares en reconocimiento tanto en tiempo de respuesta como en tasa de error). Este método es útil cuando se desean evaluar varias hipótesis en paralelo y como herramienta de clasificación de vectores característicos así como filtrado de señales de voz.

La idea básica detrás de una red neuronal es: dados una serie de parámetros, combinarlos con la finalidad de predecir un cierto resultado. El modelo de la neurona queda descrito mediante:

$$a = f(pw + b) \quad (7)$$

En (7),  $f\{\}$  representa la función de transferencia o de activación la cual puede ser lineal o no lineal,  $w$  representa el peso (o sinapsis de entrada),  $p$  es la señal de entrada,  $b$  es la señal umbral y  $a$  es la salida o axón. En esta, las funciones de transferencia pueden ser lineal, simétricas, log-sigmoidal, positivo lineal, entre otros.

El tipo de red se define según la forma en que se conectan las neuronas, el tipo de neurona que lo conforma y la forma de entrenamiento de la red. Para el caso de reconocimiento de patrones, se tienen tres tipos de redes principales: Red Perceptrón (feed forward), Red Hamming y Red de memoria asociativa (Hopfield).

Las unidades de proceso son de varios tipos pero, la más utilizada, dispone de varias entradas y la salida (figura 2) es el resultado de una transformación no lineal a la combinación lineal de las entradas. La ecuación correspondiente son dos ecuaciones 8 y 9.

$$n = w_{1,1}P_1 + w_{1,2}P_2 + \dots + w_{1,R}P_R \quad (8)$$

$$a = f(n + b) \quad (9)$$

Sin embargo, estructuras simples, no será suficiente cuando se tenga un mayor número de entradas por lo que se requerirá una estructura más compleja. A este tipo de estructura se le llama capa (la cual opera en paralelo). Si se aplica esta estructura en varias neuronas se puede llegar a estructuras más complejas (figura 3).

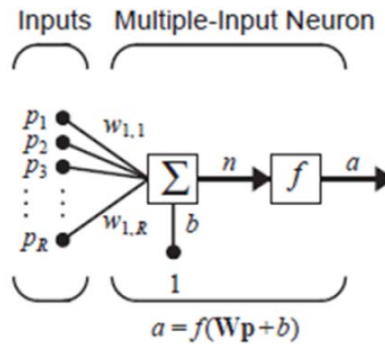


Figura 2 Neurona de entrada múltiple [21].

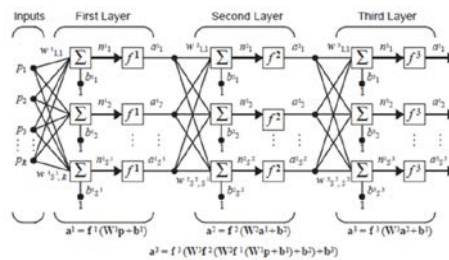


Figura 3 Red de múltiples capas [21].

De esta, el tipo de red que mejor resultado ha obtenido en reconocimiento automático del habla es el “perceptrón multicapa” (MLP) [22]. En ella las neuronas poseen capas: una capa de entrada (operando con los vectores de observación directamente), una capa de salida (apuntando a la palabra reconocida), y las respectivas capas intermedias. El enlace entre capas se da en base a ciertos pesos específicos entre neuronas. En el caso en que se requiere de un número de capas intermedias con varias neuronas cada una se clasifica como “red neuronal profunda” [23]. En ellas la idea básica es que con más capas y neuronas cada una produzca una mejor predicción del conjunto de datos.

## 5. Avances tecnológicos de reconocimiento en bioacústica

Al igual que en reconocimiento de voz, y como se mencionó anteriormente, existe una gran variabilidad de estructuras para llevar acabo el reconocimiento en bioacústica las cuales van desde los métodos de adquisición hasta los esquemas completos de reconocimiento. Algunas investigaciones, por ejemplo, se han enfocado en utilizar información frecuencial para clasificar las señales bioacústica.

En una investigación, se utilizó como método de codificación de datos una vectorización por espectrogramas [24]. Esto consiste básicamente en transformar la información del dominio temporal al dominio frecuencial, lo cual es denominado el análisis de espectro (mediante la transformada de Fourier), para después codificar dicha información en vectores. Este tipo de representación permite el observar elementos (frecuencias) que componen a un canto de ave y determinar mediante ellos, diferencias individuales, de poblaciones, entre otros. Este análisis ya ha sido estudiado con anterioridad sin embargo, mediante la vectorización propuesta, se logra mejorar el proceso de extracción de información.

Para dicha investigación, se utilizaron redes neuronales como método de clasificación siendo, la que mejor resultado brindó, la red perceptrón multicapa (MLP) con un 100% de éxito y 91% para la generalización (datos diferentes a aquellos mediante los cuales se entrena la red). Se entrenó con el algoritmo de retro propagación y gradiente descendiente con momentum.

Por otro lado, en otra investigación diferente, se utiliza el análisis puramente temporal mediante la TDSC (time domain signal coding [25]). Esto consiste en crear un alfabeto único mediante la segmentación por cruce en cero, duración de muestras y formas (todo esto en el dominio temporal). Entre las ventajas principales de esta técnica se tienen que se pueden generar características invariantes en el tiempo aunado a que la información frecuencial puede ser extraída sin sufrir limitantes de tiempo-banda de los métodos espectrales.

Esta investigación se enfocó en la identificación de 13 especies de grillos diferentes con un 100 por ciento de éxito y cero erróneas bajo condiciones de bajo nivel de ruido. Esta misma estructura se planteó para 25 especies más y 10 especies de aves japonesas (lo cual indica que una misma red puede ser utilizada para la identificación de diferentes especies). Para este caso se utilizaron una red neuronal con 784 neuronas en la capa de entrada, 20 en la capa oculta y 13 a 25 en la capa de salida. Para aves se clasificó por encima del 90% mientras que, para el caso de los grillos (bajo condiciones de poco ruido) la identificación es muy alta, entre 99 y 100% (para una identificación con un SNR variable ver [8]).



Algunos otros han optado por utilizar representaciones totalmente distintas a las frecuenciales o temporales. En donde, por medio de LPC, MFCC, etc., se identificaron 8 perros, 11 ranas y 13 aves (obteniendo 94% de eficiencia para perros, 90% para ranas y 71% en aves mediante el uso de redes neuronales) [13].

## **6. Conclusiones**

Con base en la investigación anterior se puede concluir que las técnicas de reconocimiento de voz pueden ser usadas como herramientas básicas para sistemas de reconocimiento sofisticados enfocados en bioacústica. Sin embargo, es necesario realizar algunas modificaciones debido a las condiciones de ruido en las que se llevará a cabo la identificación acústica.

Los métodos utilizados en reconocimiento enfocado en bioacústica poseen fortalezas y debilidades para cada caso según sea el enfoque de reconocimiento deseado. Sin embargo, algunos de los problemas encontrados en la mayoría de las investigaciones de la literatura consultada radican en la imposibilidad para lograr una identificación en condiciones reales. Esto conlleva a que algunas de las investigaciones posean buenos desempeños en pruebas de laboratorio (y simulaciones) pero bajo desempeño en pruebas de tiempo real debido al uso de esquemas ineficientes para extraer el ruido de la señal de interés.

Al igual que en reconocimiento de voz, las estructuras de reconocimiento en bioacústica han de ser diseñadas dependiendo el reconocimiento que se pretende alcanzar lo cual a su vez determina las técnicas de reconocimiento a utilizar. Es por ello que, el reconocimiento enfocado en bioacústica sigue siendo hoy en día un área de investigación con gran potencial.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] P. Tubaro, "Bioacústica aplicada a la sistemática, conservación y manejo de poblaciones naturales de aves". *Etología*. Vol. 7. 1999. Pp.19-32.
- [2] M. Aide,"Real-time bioacoustics monitoring and automated species identification". *PeerJ*. 2013. Pp. 1-19.

- [3] R. Carbó, "Bioacustica de fondos marinos. Acústica aplicada a la pesca". *Revista de Acústica*. Vol. 31. No. 3 y 4. Pp. 1-4.
- [4] L. Baptista, J. Martínez, "La investigación bioacústica de las aves del Archipiélago de Revillagigedo: un reporte de avance". *Revista Mexicana de Ornitología*. Vol. 3. No. 2. 2002. Pp. 33-41.
- [5] A. Navarro et al., "Biodiversidad de Aves en México". *Revista Mexicana de biodiversidad*. 2014. Pp. 476-495.
- [6] E. Villarreal, Identificación del canto de *Turdus migratorius* (Aves) utilizando un modelo acústico estadístico. Tesis licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de estudios superiores Zaragoza. 2014.
- [7] R. Rempel, "Bioacoustic monitoring of forest songbirds: interpreter variability and effects of configuration and digital processing methods in the laboratory". *Journal of Field Ornithology*. Vol. 76. No. 1. 2005. Pp. 1-11.
- [8] D. Chesmore, "Automated bioacoustic identification of species". *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. Vol. 76. No. 2. 2004. Pp. 435-440.
- [9] G. Moreno, "El comportamiento de las aves como herramienta para su identificación". *Acta Granatense*. 2006. Pp. 85-93.
- [10] C. Duncan et al., "The quest for a mechanistic understanding of biodiversity–ecosystem services relationships". The royal society publishing. 2015. Pp.1-10.
- [11] N. Toro, S. Giraldo, T. Salazar, "Reconocimiento de especies de anuros por sus cantos, en archivos de audio, mediante técnicas de procesamiento digital de señales". *Scientia et Technica*. No. 32. 2006. Pp. 1-6.
- [12] P. Catalina, J. Ruiz, M. Orozco, "Reconocimiento automatizado de señales bioacústicas: Una revisión de métodos y aplicaciones". *Ingeniería y Ciencia*. Vol. 9. No. 18. 2013. Pp. 171-195.
- [13] J. Pabico, "Automatic Identification of Animal Breeds and Species Using Bioacoustics and Artificial Neural Networks". *CoRR*. 2015.
- [14] A. Pedroza, J. de la Rosa, "El invisible y asombroso proceso de la comunicación oral: bases sobre reconocimiento de voz". *Pistas Educativas*. No. 112. Noviembre 2015. Pp. 1310-1330.

- [15] A. Buzó, "Speech Coding Based Upon Vector Quantization". IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. assp-28. No. 5. 1980. Pp. 562-574.
- [16] G. Bendezú, Filtro adaptivo LMS y su aplicación en el reconocimiento de palabra aisladas para el control de equipo de sonido por medio de la voz. Tesis de licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú: Facultad de Ciencias e Ingeniería. 2004.
- [17] M. Saerens, H. Boullard, "Linear and nonlinear prediction for speech recognition with Hidden Markov Models". En: 3rd European Conference on speech communication and technology. Berlin, Alemania. 21-26 de Septiembre de 1993. Eurospeech. 1993.
- [18] L. Rabiner, "A tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition". Proceedings of the IEEE. Vol. 77. No. 2. Febrero de 1989. Pp. 257-286.
- [19] J. Pech, Desarrollo de un sistema de reconocimiento de voz para el control de dispositivos utilizando mixturas gaussianas. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional: Centro de Investigación en Computación. 2006.
- [20] G. Hinton, "Deep Neural Networks for Acoustic Modeling in Speech Recognition". IEEE Signal Processing Magazine. 2012. Pp. 82-97.
- [21] M. Hagan, Neural Network Design. 2da. Edición, editorial Martin T. Hagan and Howard B. Demuth. 1012 páginas.
- [22] Las redes neuronales: qué son y por qué están volviendo. <http://goo.gl/GNFV>. Junio de 2014.
- [23] J. Schmidhuber, "Deep learning in neural networks: An overview". Neural Networks. Vol. 61. 2015. Pp. 85-117.
- [24] A. Castro, Construcción de una red neuronal artificial para clasificar cantos de aves: una aplicación de la inteligencia artificial a la biología. Tesis Maestría. Universidad de Costa Rica. 2006.
- [25] D. Chesmore, "Application of time domain signal coding and artificial neural networks to passive acoustical identification of animals". Applied acoustics. Vol. 62. 2001. Pp. 1359-1374.

## **8. Autores**

M.C. Ángel David Pedroza Ramírez obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería por la Universidad Autónoma de Zacatecas en 2015. Actualmente se encuentra cursando el segundo semestre del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con especialidad en Procesamiento de Señales y Mecatrónica en la misma institución. Su línea de investigación actual es en reconocimiento de voz así como identificación automática enfocada en bioacústica.

Ph.D. José Ismael de la Rosa Vargas obtuvo el grado de Doctor en Ciencias con especialidad en Procesamiento de Señales y Control (noviembre de 2002), por parte de la Universidad Paris Sud (XI) y de la Escuela Superior de Electricidad (SUPELEC) al sur de Paris (Gif-sur-Yvette), Francia. Trabaja actualmente en procesamiento de imágenes y voz, métodos estocásticos en problemas inversos e instrumentación.

D.C. Rogelio Rosas Valdez obtuvo el grado de doctor en Ciencias Biológicas en la Universidad Nacional Autónoma de México (Agosto 2008). Su línea de investigación actual es la Sistemática y Biogeografía de vertebrados de vida silvestre del estado de Zacatecas.

# MEDICIÓN DE ESTRÉS A PARTIR DE LA FRECUENCIA CARDÍACA Y LA RESPUESTA GALVÁNICA DE LA PIEL

**Mario Alain González Rivera**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

[diamydo@gmail.com](mailto:diamydo@gmail.com)

**Joel Ricardo Jiménez Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa

[jcjr@xanum.uam.mx](mailto:jcjr@xanum.uam.mx)

## Resumen

Debido a los altos índices de estrés en la sociedad moderna y las patologías que de él se derivan, es importante contar con medidas que especifiquen de manera confiable los niveles de estrés. En una población de estudiantes (mujeres y hombres entre 20 y 40 años) se encontrará cuál de las señales, Frecuencia Cardíaca (FC) e Impedancia Galvánica de la Piel (GSR), tiene mayor cambio de complejidad antes del estrés vs durante el proceso de estrés, de tal manera que se puedan identificar índices de ponderación respectivos a cada una de las dos señales. Tales índices de ponderación son importantes ya que se podrán utilizar para medir estrés de manera más objetiva a partir de un hardware que haga uso de estos índices. Se observa una diferencia entre género y nivel de estrés. El estrés se indujo por medio de ejercicios que ponen a prueba la habilidad de cálculo mental y la memoria. Se presentan las señales obtenidas durante la inducción de estrés y se comentan los métodos que se utilizarán para procesar las señales y obtener índices ponderativos que reflejen los cambios de complejidad de las señales fisiológicas en función del nivel de estrés.

**Palabras Clave:** ECG, Estrés, Entropía, GSR, SampEn.

## **1. Introducción**

Debido a los altos índices de estrés en la sociedad moderna y las patologías que de él se derivan, el estudio científico del estrés ha ido en aumento y está orientado a tratar de monitorizar estos niveles de estrés. La medición del estrés tiene un carácter subjetivo, pues cada persona tiene una respuesta diferente, tanto psicológica como fisiológica, al mismo estresor [1].

En México, la Secretaria de Salud ha reportado que el 75% de los trabajadores mexicanos padecen estrés laboral, el cual provoca 25% de los 75 mil infartos que se presentan cada año en el país [2].

El estrés es la respuesta del cuerpo a condiciones externas que perturban el equilibrio físico y emocional de la persona. Es cualquier condición que perturba seriamente la homeostasis (equilibrio dinámico del cuerpo) fisiológica y psicológica y que el organismo percibe como nociva.

El nivel óptimo de estrés es diferente para cada persona, y por eso, sólo cada persona puede determinar qué es lo que le agrada y le hace bien o le perturba [2].

El estrés es uno de los mecanismos autónomos que permite al cuerpo humano adaptarse a las distintas exigencias del medio ambiente, pero la exposición frecuente y/o prolongada a él puede desencadenar o empeorar varias enfermedades como las cardiovasculares y las nerviosas e incluso, estudios recientes han mostrado que el estrés crónico conduce a daños a nivel de ADN. Este daño al ADN inducido por el estrés promueve el envejecimiento prematuro, abortos involuntarios y cáncer [3,4].

Existen dos tipos de estrés: el estrés agudo (eustrés) de poca duración, cuyos signos y síntomas desaparecen cuando el estresor (el estímulo que provoca estrés) termina, y el estrés crónico que aparece cuando el estresor es real o imaginario pero perdura y puede ser causante de patologías [5].

En episodios de estrés se presentan diversos síntomas, entre ellos; aumento en la Frecuencia Cardíaca, en los niveles de insulina, en el sudor de la piel (disminución de la resistencia eléctrica de la piel) y en la presión arterial; la sangre es desviada a los intestinos y a los músculos. Los vasos sanguíneos se ensanchan y las pupilas se dilatan.

Con el fin de medir la intensidad del episodio de estrés de manera objetiva se puede analizar la variabilidad de algunas señales fisiológicas, como: Frecuencia Cardíaca (FC), Resistencia Galvánica de la Piel (GSR), Temperatura Corporal (TC), Actividad muscular (EMG) y Concentración de las Hormonas Cortisol y Prolactina (CH). De éstas, la FC y la GSR son las señales biomédicas que resultan más afectadas por el estrés [3, 6, 8].

Para analizar los cambios de estas señales ante situaciones de estrés se pueden utilizar métodos de análisis estadísticos lineales y no lineales con el fin de revelar información importante y así determinar si una persona está estresada o no. Algunos de los métodos que se pueden ocupar son: Correlación D2, Puntos de Poncaire, Análisis de Fluctuación, Entropía Aproximada (ApEn) y Entropía Muestral (SampEn). En la revisión de la bibliografía se encontró que el método ApEn es uno de los métodos más apropiados para estimar el nivel de estrés en las personas [7, 8, 9], sin embargo, varios trabajos han mostrado que SampEn es uno de los mejores algoritmos para medir el nivel de estrés a través de la entropía de la señal; SampEn siempre estima un mayor valor de entropía cuando el proceso es más aleatorio [8, 10, 11].

En este trabajo se investiga la variabilidad de la FC y de la GSR en relación con un estrés inducido en el laboratorio a sujetos de prueba. Se analizan las características cuando los sujetos son sometidos al proceso de estrés y cuando se encuentran en reposo utilizando medidas estadísticas básicas. Se tiene el propósito, en el futuro, de identificar los niveles de estrés a partir de los índices entrópicos de estas señales fisiológicas utilizando el algoritmo SampEn.

### **Antecedentes**

El estrés físico y mental provoca respuestas fisiológicas que están mediadas por el sistema nervioso autónomo. Los ajustes fisiológicos que hace el organismo en respuesta al evento estresante se ven reflejados en la modulación de las señales asociadas al estrés (FC, FR, EMG, TC, CH) por el sistema simpático. Este mecanismo fisiológico capacita al organismo para responder a una emergencia, bien sea luchando o huyendo de ella [4, 6].

La detección del estrés se puede realizar, además de procesamiento de señales biomédicas, a partir de sensores que miden la concentración de cortisol en saliva, el reconocimiento facial a partir de capturas de video que luego son procesadas por software o analizando patrones de voz que delatan estados de estrés [6].

En [5] se propone la construcción de un hardware para la medición de estrés a partir de una escala a la que llaman “Estrés-Bienestar” la cual depende del registro de las señales FR, EMG, GSR y de un test psicológico.

En [8] se hace un análisis comparativo de la FC por medio de algoritmos no lineales. Se evalúa el sistema cardiovascular en un grupo de estudiantes sanos sometidos a diversos tipos de estrés como el cálculo mental, la aritmética con exposición de ruido y bajo un examen académico. Se mostró que en sujetos jóvenes sanos, el estrés a corto plazo está asociado con disminuciones en la complejidad de la FC (disminución de la medida de entropía en la FC durante el estímulo estresante).

En [13] se buscó diferenciar el eustrés del estrés crónico a partir de la variabilidad de la FC. Se encontró que la variabilidad de la FC disminuyó en ambos casos reflejando una menor capacidad de adaptación y adecuación del marcapasos cardíaco que puede estar asociada con un fallo crónico de la FC. Estos resultados son consistentes con los hallados en [1], donde se encontró que la complejidad de la FC disminuía durante el estrés. En este trabajo se utilizó el algoritmo Autocorrelación D2 para analizar la variabilidad de la FC.

En [3] se analizó el estrés mientras una persona conducía un automóvil. Las señales que se registran son: FC, GSR, FR y EMG. Se detectó estrés a partir de las señales analizadas en 97% de los sujetos de prueba y los resultados muestran que la FC y GSR son las señales más correlacionadas con el nivel de estrés. En este trabajo se analizaron la variabilidad de las cuatro señales a partir de métodos Autocorrelativos.

En [8] se encontró que es posible detectar estados de estrés con un registro de tan sólo 10 segundos de las señales FC y GSR, lo cual es importante para medir estrés en tiempo real.



Las señales biomédicas son efectivas para diferenciar entre estados de tranquilidad y estados de estrés. De estas señales la GSR y la FC reflejan de mejor manera el proceso de estrés [3, 6, 9].

## **2. Desarrollo**

Para evaluar el nivel de estrés a partir de las señales de FC y GSR considérese una función matemática de la forma  $E = f(a, b)$  donde “a” y “b” son índices de ponderación respectivos a la GSR y a la FC. El propósito es obtener información mucho más precisa y adecuada al estado particular de cada sujeto que indique su nivel de estrés. La idea principal es particularizar la toma de los índices (“a”, “b”) para cada persona y no generalizar que el estrés es el mismo para todas las personas. Es decir se trata de tomar en cuenta, no sólo los factores externos que inciden y estimulan la generación de estrés en una persona, sino también su estado interno y personalidad particular. Se tiene conocimiento que la FC y la GSR tienen la tendencia a disminuir su complejidad durante un evento estresante [9, 14].

Con el fin de obtener el nivel del estrés de las señales de FC y GSR, en este trabajo se reporta la selección de los sujetos de prueba, la calibración de los equipos de adquisición, adquisición de las señales, presentación de las señales por medio de los equipos comerciales Biopac y una estadística inicial de los datos recabados por medio de Matlab.

El procedimiento que se realizó consistió en calibrar el equipo, tomar de los sujetos de prueba las señales en reposo y las correspondientes señales a un estrés inducido. Posteriormente se realizó una inspección visual de las señales obtenidas y un tratamiento estadístico inicial.

### **Selección de los sujetos de prueba**

La muestra para realizar este experimento consistió en un grupo de 16 estudiantes universitarios (8 mujeres y 8 hombres) entre 20 y 40 años. En la selección de los sujetos se efectuó una revisión considerando los siguientes criterios de exclusión:

- Imposibilidad para la realización integral de las pruebas.
- Relato de problemas cardiorrespiratorios.
- Problemas visuales o auditivos sin corrección.
- Utilización de drogas que pudiesen comprometer las funciones cognitivas.
- En el caso de las mujeres, no estar bajo periodo de menstruación.

A los sujetos de prueba (los que no fueron excluidos) se les indicó que no ingirieran café, bebidas energéticas o alcohol una noche antes de la toma de las señales.

### **Pruebas para la inducción del estrés**

Después de adquirir las señales en reposo, se les pidió a los individuos (parejas del mismo sexo) que comenzaran a jugar un videojuego por 20 minutos [15]. Este juego se trata de una burbuja a la cual hay que llevar hasta un hueco con una especie de trampolín con imán, si la burbuja toca algún borde o se cae, se pierde. La forma de jugarlo es muy sencilla, se dirige la burbuja sólo con el mouse y el objetivo es insertar la burbuja en el hueco. Este juego merece mucha concentración y paciencia, después de haber hecho varios intentos, la experiencia de jugarlo resulta desesperante. El propósito del juego es concentrar la atención de los individuos a una tarea específica (jugar), de manera que les resultará difícil comenzar a concentrarse en otra tarea cuando el cambio de éstas es súbito. Durante estos 20 minutos del video juego, los individuos seguían conectados al equipo Biopac, pero no se registraban las señales.

Después de los 20 minutos del videojuego, súbitamente se les pidió a los sujetos que pararan de jugar, que se miraran de frente (sin levantarse de la silla) y que comenzaran a recitar el abecedario de manera inversa. Justo en este momento se comenzó la adquisición de las señales por 10 minutos y de manera simultánea en los dos sujetos; uno de los sujetos comenzará por la letra “z”, y el otro sujeto dirá la siguiente letra, lo más rápido que pueda, es decir “y”. Así hasta llegar a la letra “a”. Los sujetos fueron “apresurados” para decir la letra que les correspondía con la intención de ejercer en ellos “presión” psicológica. Después de terminar esta

prueba se le pide al sujeto que dijo la letra “y” que pensara en el número 473 y que restara de él 7, en seguida el otro sujeto deberá de restar 7 a la cantidad resultante que el primer sujeto haya dicho (o sea, 466); Esto es, restas consecutivas e intercaladas de 7 en 7, iniciando en 473. En esta prueba se continuó “apresurando” a los sujetos.

A las personas que terminaron la prueba antes de los 10 minutos de adquisición, se les siguió haciendo preguntas, como, por ejemplo; ¿qué letra está antes (o después) de la “u”? ¿Cuánto es 228 menos (o más) 7?

El hecho de que se haga el test de inducción de estrés en parejas del mismo sexo estimula el sentido de competitividad y la premura por responder es desesperante, lo que resulta en que el estrés inducido sea más apegado a una situación real de estrés [16, 17].

### Calibración del equipo

Con el fin de asegurarse de una adecuada adquisición de las señales se practicaron pruebas preliminares para ajustar parámetros de los equipos de GSR (EDA100C) y ECG (ECG100C) de Biopac® (figura 1) y el software de adquisición AcqKnowledge® como lo son; frecuencias de corte de los filtro pasa bajas (LP), pasa altas (HP), ganancias (GAIN), frecuencia de muestreo (fm) y tiempo de adquisición (ta). El módulo de GSR se necesita recalibrar antes de cada adquisición.



Figura 1 Los módulos de adquisición GSR (EDA100C) y ECG (ECG100C).

En la tabla 1 se especifican los parámetros de adquisición que se seleccionaron, con los que se configuraron los módulos de EDA100C y ECG100C. Los parámetros fm y tm se configuran desde el software de adquisición de AcqKnowledge®. El resto de los parámetros están indicados en la parte frontal de su respectivo módulo y se seleccionan con palancas que deslizan de arriba hacia abajo. Las unidades de la GSR están dadas en siemens (S).

Tabla 1 Parámetros de adquisición.

GSR		ECG	
GAIN	2 $\mu$ S/V	GAIN	1000
LP	10 Hz	MODE	NORM
HP-0.5 Hz	DC	LP	150 Hz
HP-0.05 Hz	DC	HP	0.05 Hz
fm	250 Hz	fm	1000
tm	10 min.	tm	10 min.

Se muestra el registro del par de señales GSR de un sujeto masculino (S1) antes (azul) y durante la inducción de estrés (rojo). Este par de señales fue tomado antes de calibrar el módulo EDA100C. Lo interesante de las gráficas es notar que a partir de los 10 usiemens la señal GSR se satura y no es posible registrar variaciones. Este efecto de saturación es debido a que no se calibró el rango dinámico del módulo (figura 2).

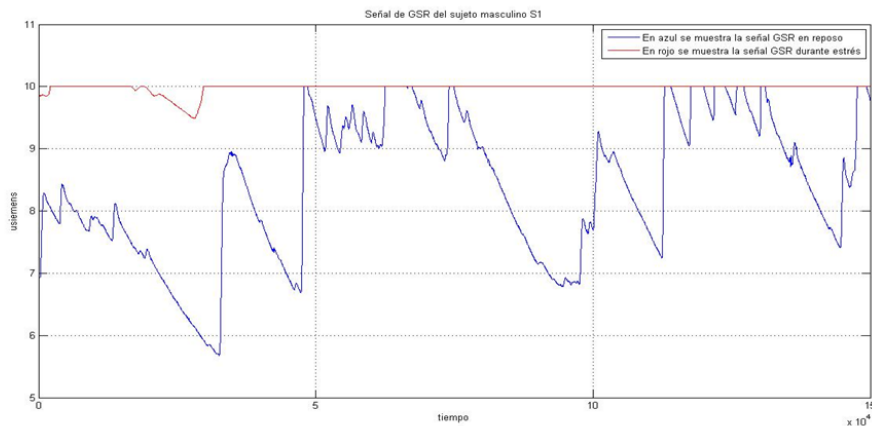


Figura 2 GSR antes (azul) y durante (rojo) la inducción de estrés sujeto masculino S1.

## **Adquisición de las señales de ECG y GSR**

La adquisición de las señales se realizó en los laboratorios de docencia de Ingeniería Biomédica de la UAMI (Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa), donde se utilizó el sistema Biopac® para la adquisición y digitalización de las señales, y el software AcqKnowledge® para la visualización de las señales. Se tomaron precauciones para mantener condiciones similares en todas las señales adquiridas, las cuales fueron: realizar todas adquisiciones a la misma hora del día, se observó la condición física y respiratoria de los sujetos, las pruebas se realizaron con los sujetos sentados cómodamente y se permitió un tiempo de adaptación y aclimatación del medio ambiente (Laboratorio de docencia) de al menos 10 minutos durante los cuales se les explicaba brevemente a los sujetos de prueba dónde irían colocados los electrodos, el funcionamiento del Biopac, etc. y esto con motivo de relajar al sujeto.

La adquisición de las señales se realizó por parejas del mismo sexo, se les invitó a que tomaran asiento frente al equipo Biopac y después de unos 10 minutos de haberse aclimatado al ambiente de laboratorio, se les pidió que tomaran asiento frente al Biopac y se comenzaron a registrar las 2 señales (ECG y GSR) simultáneamente durante 10 minutos. Así se tomaron las señales en reposo a las 8 distintas parejas. Después de haber pasado los 10 primeros minutos de adquisición en reposo, se dejaron pasar 5 minutos y se les aplicaron pruebas de inducción de estrés simultáneamente a los dos sujetos. Las personas tenían la libertad de abortar el test de inducción de estrés en el momento que lo desearan. Se adquirió un par de sujetos por día.

A cada persona se le tomaron la FC y la GSR en reposo y durante el proceso de estrés inducido dando un total 64 señales distintas (4 señales por persona 16 personas). Se registró la derivación II del ECG para obtener una mayor amplitud en el pico R. Se usaron electrodos de dedo para la adquisición de la señal GSR y electrodos tipo parche desechable para el ECG.

Cuando la persona se encuentra en reposo se considera el estado basal desde el cual se comienza a medir la variación de las señales.

### 3. Resultados

En seguida se muestran algunas de las señales adquiridas durante el reposo y durante la inducción de estrés. Se grafican pares de señales en un mismo eje coordenado para facilitar una comparación visual. Además, para la visualización de la señal ECG es necesario hacer zoom en el tiempo de manera que se muestra un trozo de la señal, sumando un componente de DC para separar las señales y evitar que se encimen.

Las figuras 3 y 4 muestran el registro de las señales del sujeto masculino S11. La figura 3 muestra en azul los valores de la señal GSR en reposo y en rojo con inducción de estrés. En la figura 4 muestra el registro de las señales ECG, en rojo durante estrés donde se observa un aumento en la frecuencia cardiaca.

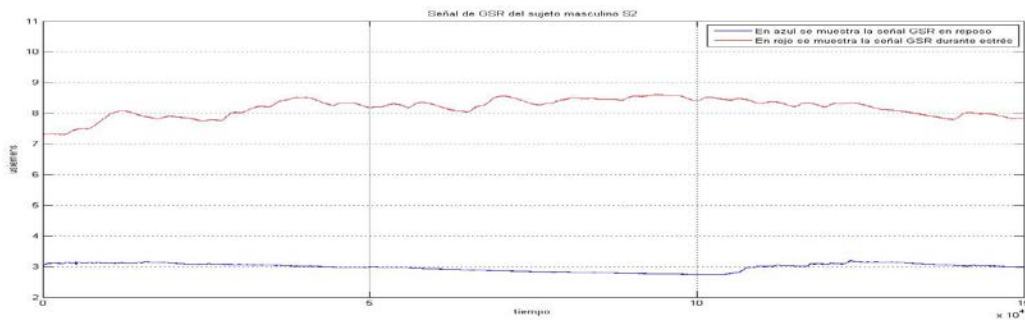


Figura 3 GSR antes (azul) y durante (rojo) la inducción de estrés sujeto masculino S11.

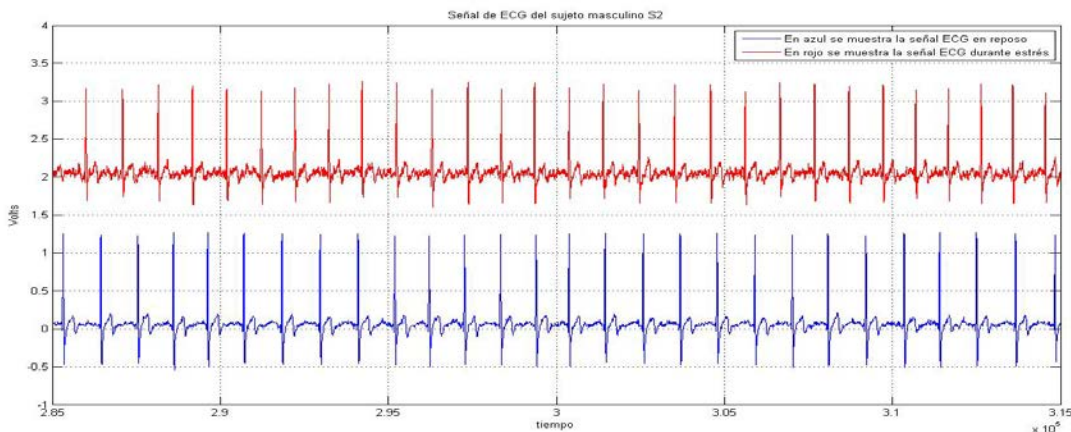


Figura 4 ECG antes (azul) y durante (rojo) la inducción de estrés sujeto masculino S11.

## Tratamiento Estadístico inicial de los datos

En esta sección se presentan los valores de FC y el valor medio de la señal ECG de cada sujeto. Se promedia los valores obtenidos con la intención de tener un primer acercamiento cuantitativo al comportamiento de los datos y comparar la tendencia de los mismos con la información recabada en este trabajo.

Antes de calcular valores la FC y el valor medio de la GSR, se hizo un procesamiento digital a las señales para eliminar ruido debido a interferencias ambientales, movimientos involuntarios de los sujetos, etc. La FC se calculó a partir de la distancia promedio entre picos R's consecutivos del ECG; de manera que a menor distancia entre picos consecutivos es mayor la FC. De la señal GSR se calculó el promedio. Esto se hizo para cada una de las señales. Todo el procesamiento se hizo en Matlab.

Se muestra gráficamente el resultado del procesamiento de las señales para calcular FC a partir de la señal ECG. La figura 5 muestra el resultado gráfico del procesamiento sobre la señal ECG para calcular la FC durante la inducción de estrés. La figura 6 muestra un trozo de la misma señal ECG durante la inducción de estrés (ECG original que se observada en la figura 5) y la coincidencia de la posición de la onda R (en círculos negros se marca la posición de la onda R que el procesamiento digital identificó).

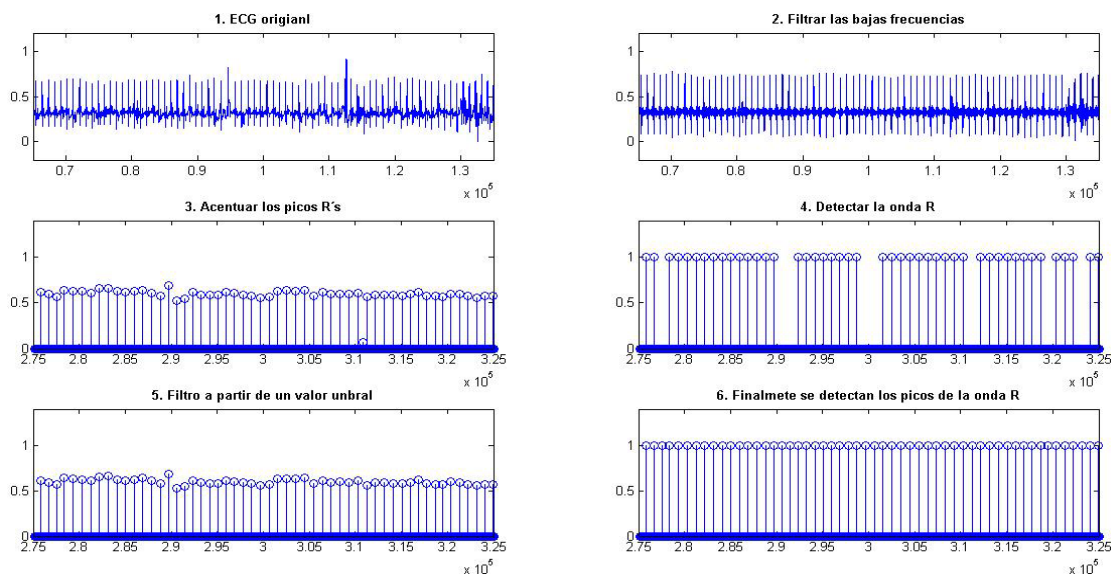


Figura 5 ECG para obtener la FC. Inducción de estrés, corresponde un sujeto masculino.

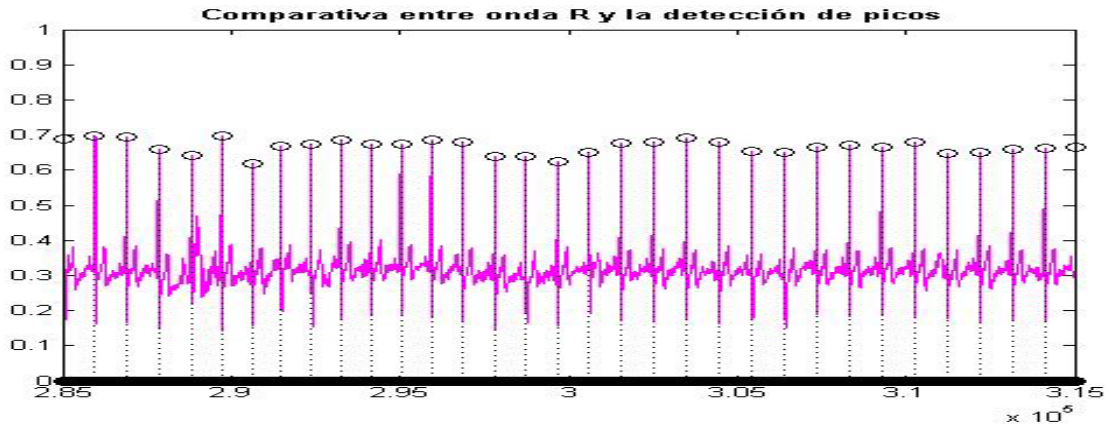


Figura 6 Trozo de señal ECG durante la inducción de estrés

Para obtener el promedio de la señal GSR se filtró para suavizarla; eliminar los artificios de ruido: del ambiente, movimientos del sujeto de prueba, etc. La figura 7 muestra la señal GSR en durante la inducción de estrés antes y después de ser filtrada.

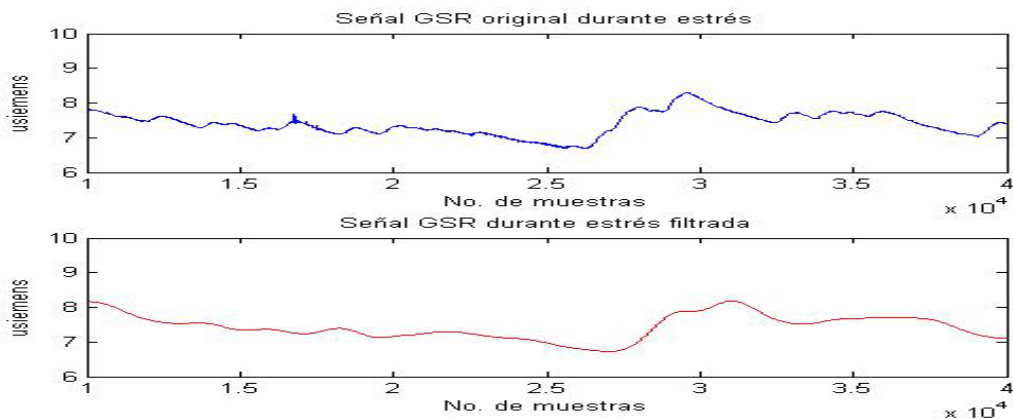


Figura 7 GSR durante la inducción de estrés en azul antes y en rojo después de filtrar

En la tabla 2 se documentan los valores de FC y el promedio de la GSR, durante reposo y durante la inducción de estrés, después de procesar digitalmente todas las señales. Los primeros ocho sujetos (S1 a S8) son femeninos, el resto son masculinos (S9 a 16).

En la tabla 3 se documenta los valores promedios por señal, condición y género (Masculino (M) y Femenino (F)). En la tabla 4 se muestra el promedio de total, el de los 16 sujetos de prueba, por señal y condición.



Tabla 2 valores de FC y el promedio de la GSR.

Sujeto de prueba	FC [bpm]		GSR [usiemens]	
	Reposo	Estrés	Reposo	Estrés
S1	70.189	77.967	6.030	9.416
S2	89.168	99.976	4.766	5.689
S3	73.642	81.479	2.262	6.555
S4	90.007	88.002	9.389	14.470
S5	66.602	69.978	12.205	14.558
S6	65.784	72.055	2.799	6.271
S7	73.177	79.384	5.500	8.721
S8	65.310	70.535	7.668	9.697
S9	71.150	76.715	5.212	8.676
S10	58.770	63.650	0.558	6.463
S11	82.177	79.828	3.283	6.076
S12	72.456	79.734	6.248	9.477
S13	53.807	59.730	2.957	8.035
S14	85.098	73.784	8.308	10.021
S15	71.642	65.219	6.938	19.692
S16	83.508	87.812	8.446	10.380

Tabla 3 Promedio por señal, condición y género (Masculino (M) y Femenino (F)).

ECG [bpm]				GSR [usiemens]			
Reposo		Estrés		Reposo		Estrés	
M	F	M	F	M	F	M	F
72.326	74.235	73.309	79.922	5.244	6.730	9.853	9.020

Tabla 4 Promedio de los 16 sujetos por señal antes y durante la inducción de estrés.

ECG [bpm]		GSR [usiemens]	
Reposo	Estrés	Reposo	Estrés
73.280	76.616	5.987	9.436

## 4. Discusión

A pesar que la medición fisiológica del estrés se puede llevar a cabo por varias señales importantes como la electromiografía, la electroencefalografía y la respuesta respiratoria, de acuerdo a la investigación realizada, resulta que las señales más confiables son la Frecuencia Cardiaca y la Respuesta Galvánica de

la Piel. Con estas señales se pueden diferenciar estados de reposo y estados de estrés en las personas.

La inspección visual y el tratamiento estadístico permiten constatar que las señales, además de las diferencias entre los estados (reposo o estrés), también permiten identificar que existen respuestas diferentes de los sujetos de prueba (se puede notar el carácter subjetivo del estrés).

Este trabajo de investigación persigue personalizar la medición del estrés, ya que distintos individuos pueden responder de manera distinta al mismo estresor. La primera fase de este trabajo; la rutina de inducción de estrés, la rutina de adquisición de las señales, la primera etapa de procesamiento digital y la extracción de información estadística han revelado información muy prometedora con respecto al objetivo de este trabajo. Pues bien, la tendencia media de ambas señales (FC y GSR) aumentó y este resultado es consistente con [8]. Al respecto de la FC, hubo algunos datos que no aumentaron después de inducir estrés. Este comportamiento atípico se puede ver en S4, S11 y S14 (tabla 2). De S4 podemos decir que era el único sujeto que estaba lactando. Esta condición, de lactancia, se puede incluir en futuros trabajos como parámetro de exclusión al elegir a los sujetos de prueba. En el caso de la GSR, todos los sujetos aumentaron en su medida de GSR durante la inducción de estrés. Este resultado es consistente con [6] y [3]. Con S2, tanto en FC como en GSR, tiene un comportamiento que hemos de destacar; su FC es elevada aún en reposo y se eleva casi hasta 100 bpm y su GSR cambió en menos de una unidad y, de hecho, fue en el que menos cambio se observó. S2, juzgando de vista, tenía un leve sobrepeso. El peso del sujeto puede ser otro criterio de exclusión en futuros trabajos. De la tabla 3 se observa que la GSR tuvo un cambio más significativo antes de estrés vs durante la inducción de estrés. De la tabla 2 se nota que los promedios de FC son muy similares, sin embargo, el promedio de FC durante estrés es mayor en mujeres. Con la GSR pasa lo contrario, el valor promedio es ligeramente mayor en hombres. Los promedios en reposo de la tabla 2 son consistentes con los reportados en [14], [9] y [7].

## **Trabajo futuro: Obtención de los índices entrópicos**

Con el fin de personalizar la medición del estrés se está trabajando en varios algoritmos que detecten el grado de entropía de cada una de las señales de FC y GSR. Para comparar los cambios en entropía nos basaremos en [18] donde se compara la entropía por medio del cociente “entropía durante estrés / entropía antes de estrés (reposo)”.

Será necesaria una rutina para medir la entropía a partir del algoritmo SampEn. Este código tendrá como entrada un vector de valores digitales de FC y GSR. Como resultado, deberá arrojar un escalar que corresponde a la medida de la entropía. Si se ingresa el vector FC el código regresará un escalar que corresponde a la entropía de la FC. Si se ingresa el vector de valores de GSR el código regresará un escalar que corresponde a la entropía de la GSR. Esta rutina aplicará para las 2 señales (FC y GSR) antes del estrés (en reposo) y durante la inducción de estrés.

## **5. Conclusiones**

El estrés es un estado común en los seres humanos para afrontar diversas situaciones de la vida cotidiana; sin embargo, cuando es prolongado o es de gran intensidad puede provocar afecciones, como son presión arterial alta, diabetes, trastornos neuro-psiquiátricos, depresión, entre otros. Entonces es de vital importancia poder medir y prevenir la ocurrencia continua y/o prolongada del estrés [9].

Los factores que inciden en la medición del estrés son variados y en su evaluación se deben tomar en cuenta factores externos e internos. Una idea importante es encontrar índices confiables que tomen en cuenta tanto los eventos estresantes como la respuesta particular de cada persona.

En este trabajo se muestran los avances para realizar el registro y evaluación de los episodios de estrés. Sería importante mostrar estos estados utilizando equipos móviles que permitan monitorizar y guardar los diferentes estados y puedan enviar esas señales a personal médico para que los evalúe.

Estos primeros resultados estadísticos revelan información concluyente; La GSR puede resultar una señal más correlacionada que la FC con el estrés, pues la tendencia de la GSR fue consistente en todos los sujetos; aumentó debido a un evento estresante. Mientras que la FC no fue consistente en su tendencia, pues en tres de los sujetos disminuyó. De manera que se puede ponderar con mayor peso a la GSR que a la FC para medir estrés. Aún falta reafirmar, o refutar, estos primeros datos cuantitativos a partir del algoritmo no lineal SampEn que arrojará información más intrincada de las señales. Hasta esta fase, esperamos observar una tendencia a disminuir de la entropía de las señales FC y GSR según [13], [16] y [18]. Pero, además, ¿qué tanto disminuirá la entropía debida al estrés? ¿Disminuirá con una tendencia uniforme o sólo disminuirá en promedio? ¿Cuál de las dos señales tendrá una disminución más pronunciada? Las respuestas a preguntas de esta índole son las que nos reafirmaran o refutaran éstos primeros resultados que en este presente trabajo hemos reportado.

## 6. Referencias

- [1] F. D. Barbosa, F. A. Prada, M. Clanner, N. O. de Toledo, C. Córdova, "Respuesta Cardiovascular al Stroop: Comparación entre test Computarizado y Verbal". Publicación de Sociedad Brasileña de Cardiología. Abril 2010. Pp.491-495.
- [2] Informe de la Secretaria de Salud. <http://www.innsz.mx/imagenes/noticias/archivos/Sintesis18mayo2015.pdf>.
- [3] J. A. Healey, R. W. Picard, "Detecting stress during real world driving tasks using physiological sensors". *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*. Volumen 6. Junio 2013. Pp. 156-166.
- [4] A. de Santos Sierra, C. Sánchez Ávila, J. Guerra Casanova, G. Bailador del Pozo, "A Stress-Detection System Based on Physiological Signals and Fuzzy Logic" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 58. No. 10. October 2011. Pp. 4857-4865.

- [5] A. M. E. Sánchez, O. G. Pérez, S. L. Leija, “Medición integral de estrés crónico”. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*. Volumen 25. 2004. Pp. 60-67.
- [6] M. Acevedo, P. A. De Luca “Sistema de medición de estrés”. *Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica*. Volumen 22. Enero-marzo 2005. Pp. 20-25.
- [7] G. Tanev, D. B. Saadi, K. Hoppe, B. D. Sorensen. “Classification of Actue Stress using Linear and Non Linear Heart Rate Variability Analysis Derived from Sternal ECG”. *IEEE Engineering in Medicine and Biology*. August 2014. Pp 3386-3389.
- [8] M. A. Picó, “Caracterización de medidas de regularidad en señales biomédicas”. Editorial Universidad Politécnica de Valencia. Julio 2014.
- [9] V. S. Anischenko, N. B. Igosheva, A. N. Pavlov, I. A. Khovanov, T. A. Yakusheva. “Comparative Analysis of Methods for Classifying the Cardiovascular System’s States Under Stress”. *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. No. 2. 2001. Pp 460-481.
- [10] J. González, C. Granados, H. López, I. Torres “Aplicación del cálculo de la entropía para el estudio de registros Electroencefalográficos”. *Matemática, Escuela Politécnica del Litoral*. Vol. 8. Octubre 2010. Pp. 16-21.
- [11] S. Joshua, R. Moorman. “Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy”. *The American Physiological Society*. Vol. 278. 2000. Pp. H2039–H2049.
- [12] S. Pincus, I. Glandstone, R. Ehrenkranz. “A regularity statics for medical data analysis”. *Journal of Clinical Monitoring*. Vol. 7. No. 4. 1991. Pp. 335-345.
- [13] C. Schubert, M. Lambertz, R.A. Nelesen, W. Bardwell, J. B. Choi, J.E. Dimsdale. “Effects of stress on heart rate complexity—A comparison between short-term and chronic stress”. *Biol Psychol*. Vol. 80. No. 3. March 2010. Pp. 325-332.
- [14] C. Schubert, M. Lambertz, R.A. Nelesen, W. Bardwell, J. B. Choi, J.E. Dimsdale. “Effects of stress on heart rate complexity—A comparison

- between short-term and chronic stress”. *Biol Psychol.* Vol. 80. No. 3. March 2010. Pp. 325-332.
- [15] Videojuego línea: <http://www.zanorg.com/prodperso/jeuxchiants/ventilo.swf>
- [16] P. Mellino, M. Bracale, L. Pecchia. “Nonlinear Heart Rate Variability features for real-life stress detection. Case study: students under stress due to university examination”. *Biomedical Engineer.* 2011. Pp. 1-13.
- [17] L. Moya-Albiol, A. Salvador “Empleo de estresores psicológicos de laboratorio en el estudio de la respuesta fisiológica al estrés”. *Revista publicada por la Universidad de Valencia Anales de Psicología.* Volumen 17. No. 1. Junio 2001. Pp. 69-81.
- [18] V. S. Anischenko, N. B. Igosheva, A. N. Pavlov, I. A. Khovanov, T. A. Yakusheva. “Comparative Analysis of Methods for Classifying the Cardiovascular System’s States Under Stress”. *Critical Reviews in Biomedical Engineering.* No. 2. 2001. Pp 460-481.

## **7. Autores**

Mario Alaín González Rivera está por obtener su título de Licenciatura de Ingeniería Biomédica en la UAM-I. Sus áreas de interés son la instrumentación y el análisis de señales biomédicas.

Joel Ricardo Jiménez Cruz es profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica en la UAM-I y cultiva el área de conocimiento de la Cibernética.

## **8. Agradecimientos**

Se agradece la ayuda prestada por la Pasante en Ingeniería Biomédica Faviola Crisóstomos P. por colaborar en la adquisición de las señales y a Iris Yazmín Martínez R. estudiante de Relaciones Internacionales, por la revisión ortográfica del texto.

# **SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE DÍGITOS MANUSCRITOS UTILIZANDO REDES NEURONALES**

***Juan Manuel Martínez Cabrera***

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*klamath135@yahoo.com*

***Aldonso Becerra Sánchez***

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*a7donso@uaz.edu.mx*

***Gustavo Zepeda Valles***

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*gzepeda@hotmail.com*

***Santiago Esparza Guerrero***

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*chagouaz@hotmail.com*

***Uriel Ramírez García Correa***

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*uramirezgc@uaz.edu.mx*

## **Resumen**

El reconocimiento de dígitos manuscritos es un entorno en creciente uso y por consiguiente requiere ir abordando alternativas para su implementación, el uso de redes neuronales ha venido retomando el auge dentro del área de reconocimiento de patrones. Este documento muestra el uso de redes neuronales, a través de un software personalizado, como el motor detrás un sistema de reconocimiento de caracteres ópticos. En este sistema los dígitos numéricos son simplificados a través de filtros de imagen y luego presentados como entrada a la red neuronal para entrenarla (usando el algoritmo de retro-propagación) y ser capaz de clasificar otras muestras en la etapa de pruebas. Los resultados muestran tasas

de reconocimiento cercanas al 85%, que se pueden considerar como aceptables para topologías de una sola capa, dejando pendiente para futuros experimentos el trabajo con redes multicapa pre-entrenadas, ya que suelen incrementar fuertemente su eficiencia.

**Palabra(s) Clave(s):** Aprendizaje de máquina, perceptrón multicapa, reconocimiento de caracteres ópticos.

## 1. Introducción

El OCR o Reconocimiento Óptico de Caracteres es la identificación de caracteres impresos mediante el uso de dispositivos fotoeléctricos y software. Si bien el trabajo con los OCR no es nuevo y existen varios métodos para la clasificación de los patrones existen aún rutas que resolver para llegar a poder aplicarlos con mayor eficacia. Algunos de los métodos tradicionalmente usados se basan en los algoritmos de k-vecinos, las maquinas de soporte vectorial (SVM) y comparación contra plantillas (Template Matching). En este sentido existen trabajos que han manifestado el interés y desarrollo de propuestas en sistemas de reconocimiento basándose en el método KNN, Geometric features y la base de datos de Brasil PS con 190 muestras de prueba [18]. Wang [19] obtuvo buenos resultados también utilizando el método de SVM y la base de datos de Bangladesh PS con 16,000 muestras. De igual manera, Hull et al. [20] obtuvieron tasas de reconocimiento bastante considerables con el método de Template Matching más el clasificador estadístico mixto y la base de datos de USPS con 9,754 muestras. El interés de utilizar las redes neuronales en el OCR recientemente ha sido debido a su potencial considerando la manipulación libre de topología que la integrará, y que varios trabajos [1 - 3] han evidenciado.

La motivación para la elaboración del presente trabajo es el interés sobre la versatilidad de las redes neuronales convencionales en una gran diversidad de ámbitos y sobre su capacidad para resolver problemas de alta complejidad sin necesidad de conocer su solución, con el objetivo de implementar una red neuronal que se podrá adaptar a otros proyectos en el futuro. Sin embargo, este trabajo se enfoca en adaptar una red neuronal convencional y de uso general para



su utilización en la fase de reconocimiento del sistema OCR a desarrollar, haciéndose pruebas con varias topologías de red para encontrar la más adecuada al reconocimiento de los dígitos numéricos; para llevar a cabo este cometido, se desarrolló un software que permite acoplar las diferentes fases de la implementación de clasificadores de patrones usando redes neuronales, aunque este software tiene flexibilidad de permitir crecer su funcionalidad y en dado caso poder usar otras variantes, tanto para el módulo del clasificador como para los datos de entrada.

Los resultados en los experimentos con diferentes topologías muestran que las tasas alcanzadas, cercanas al 85%, se pueden considerar como aceptables, tomando en cuenta que se usan redes de una sola capa y con pesos aleatorios. Sin embargo es importante mencionar que aún existe trayecto que andar en la experimentación de redes neuronales, pero con multicapa y con pesos pre-entrenados.

El resto del trabajo está compuesto por las siguientes secciones. En la sección 2 se presenta la teoría del OCR, sus pasos y la teoría sobre las redes neuronales. La sección 3 describe la metodología y los materiales. La sección 4 describe el diseño e implementación del sistema. La sección 5 describe los resultados del entrenamiento y decodificación que se le hizo a varias topologías de red. La sección 6 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

## **2. Principios de reconocimiento óptico de caracteres**

### **Etapas de un OCR**

Todos los sistemas de OCR siguen una serie de etapas básicas para alcanzar su cometido [4 - 9]. Estas etapas en general son:

- **Obtención de Imagen** – En esta etapa hay dos formas en cómo se obtiene los datos de entrada al sistema, el modo “Offline” y el modo “Online” [5]. En el modo Offline se trabaja con imágenes digitales de un escáner, una cámara u otra fuente digital que contienen texto a reconocer. En el modo Online se trabaja con datos obtenidos en tiempo real de un dispositivo. Estos datos son información vectorial que describen trazos.

- **Segmentación** – En esta etapa se busca extraer cada caracter de la imagen. La etapa de segmentación es una parte integral para cualquier sistema de reconocimiento de texto [8]. Divide la imagen en diferentes caracteres aislados que permite clasificarlos individualmente, de esta forma asegura la eficiencia de la clasificación.
- **Pre-Procesamiento** – Esta etapa sirve para limpiar, normalizar y simplificar la imagen para que la siguiente etapa pueda realizar su tarea de forma eficaz y eficiente [10]. Algunos de estos procesos son:
  - ✓ Auto-Cropping en donde se le remueve espacio en blanco alrededor del caracter.
  - ✓ Normalización en donde la imagen es transformada a un tamaño estándar.
  - ✓ Binarización en donde la imagen es simplificada en un mapa de bits (bitmap) de 0 y 1s,
  - ✓ Los filtros que semuestran en la figura 1 son los de auto-cropping, normalización y binarización.

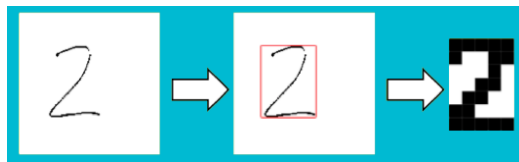


Figura 1 Pre-procesamiento de Imagen.

- **Entrenamiento / Clasificación** – El objetivo de esta última etapa es el de asociar el conjunto de datos obtenidos en la etapa anterior a un caracter de una clase en particular. Existen motores para lograr este fin, algunos son: El método K-NN (K Vecinos), Template Matching (Comparar contra una Plantilla), los Support Vector Machines y las Redes Neuronales Artificiales.

## Redes Neuronales Artificiales

Una red neuronal artificial consiste de un número de procesadores muy simples e interconectados llamados neuronas, los cuales son análogos a las neuronas biológicas en un cerebro. La ventaja principal de las redes neuronales artificiales

está en su capacidad en aprender automáticamente de ejemplos y tienen buen desempeño con datos con ruido [11]. Las neuronas están interconectadas con conexiones llamadas sinapsis, cada sinapsis tiene un peso numérico asociado a ella. Los pesos son la forma básica de representar la memoria de una red y expresan la potencia de cada neurona. La red neuronal artificial puede aprender a través de continuamente ajustar estos pesos [12].

El autor José Juan Castaneyra-Matus [4] logra tener un porcentaje de reconocimiento del 86.44% con una topología de 35x15x10 con 15,000 muestras de la base de datos MNIST y tasa de aprendizaje de 0.1 en su implementación de reconociendo de dígitos con una red neuronal, y un porcentaje de 86.80 con una topología de 35x20x15x10.

La autora Leticia María Seijas [15] utiliza tres diferentes bases de datos con los dígitos manuscritos, ello no les aplica filtros a las imágenes. Con la base de datos CENPARMI y una topología de 256x160x10 logra un porcentaje de reconocimiento de 89.05%. Con la BD MNIST, topología de 784x100x10 logra un porcentaje de 76.86%. Con la base de datos MNIST binarizada y topología de 784x160x10 logra un porcentaje de 96.22%.

### Modelo de una Neurona Artificial

Una neurona artificial es una unidad de procesamiento de información fundamental a la operación de una red neuronal artificial. En las redes neuronales artificiales, la neurona cuenta con tres elementos básicos de su modelo, sus sinapsis, el sumador y la función de activación [3-9]. Un modelo de una neurona artificial es mostrado en la figura 2.

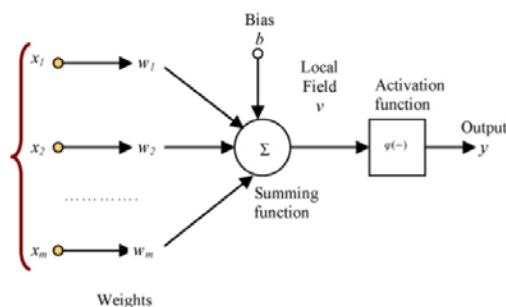


Figura 2 Neurona Artificial.

La neurona cuenta con un conjunto de sinapsis o conexiones de entrada a otras neuronas. Cada sinapsis cuenta con un peso. Los pesos de una sinapsis pueden ir de lo negativo a lo positivo. El sumador se encarga de sumar las señales de entrada multiplicadas por el peso de la sinapsis de la neurona. Este tipo de sumador es un combinador lineal. La función de activación se requiere para limitar la salida de la neurona. El bias  $b$  es un parámetro artificial y permite a una red neuronal aprender, aunque todas sus señales de entrada sean ceros. El bias puede tener un valor positivo o negativo.

La neurona artificial cuenta con el sumador (ecuación 1) para procesar sus señales y pesos de entrada. Esta función:  $k$  se refiere a la neurona,  $x_1, x_2, \dots, x_m$  son las señales de entrada;  $w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$  son los pesos sinápticos de la neurona  $k$ ;  $v_k$  es la salida del sumador,  $b_k$  es el bias (umbral), y  $y_k$  es la salida de la neurona.

$$v_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j + b_k \quad (1)$$

La función de activación (ecuación 2) toma como entrada  $v_k$  y produce como salida  $y_k$ .

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (2)$$

La función Sigmoidea (ecuación 3) es una función de activación concreta, es una de las más populares en la construcción de redes neuronales debido a sus propiedades de ser limitador suave [1]. Mientras que la función escalón toma el valor de 0 o 1, la función sigmoidea toma un rango continuo de valores de 0 a 1.

$$\varphi(v) = \frac{1}{1+e^{-v}} \quad (3)$$

## Aprendizaje Supervisado

En el entrenamiento supervisado la red neuronal es entrenada con los datos de entrada que llevan asociados sus respectivas salidas esperadas. Durante el entrenamiento se calcula la salida correspondiente a un conjunto de datos de entrada dado y se compara con la salida esperada, de esta forma es posible conocer el error y ajustar los pesos de acuerdo a este [4] [13].

## Arquitectura de Red Alimentación Hacia Delante

En una red neuronal de alimentación hacia delante (Feed Forward) las neuronas se organizan en forma de niveles llamadas capas. Las neuronas de una capa se conectan con todas las neuronas de la capa siguiente y de la capa anterior en la red. El flujo de datos introducidos es estrictamente hacia delante, los datos pasan desde los nodos de entrada hasta los de salida [5].

Son redes no cíclicas, las salidas de una capa no afectan esa misma capa [14]. Una vez que esté entrenada una red neuronal Feed-Forward, su estado es fijo y no se altera cuando se le presentan nuevos datos de entrada. La figura 3 muestra esta topología.

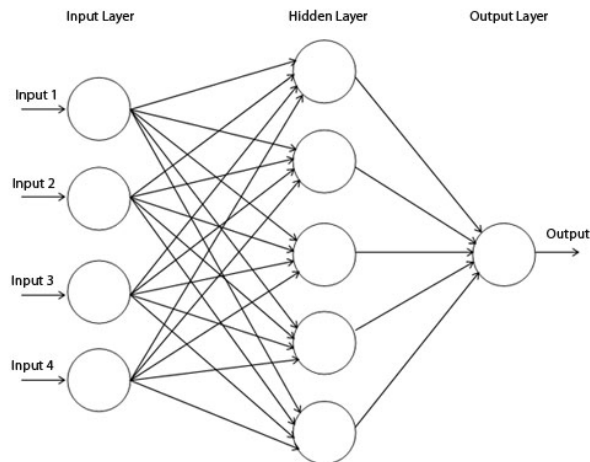


Figura 3 Perceptrón Multicapa con Alimentación Hacia Delante.

## Red Neuronal Perceptrón Multicapa

El perceptrón multicapa (MLP–Multi Layered Perceptron) es una extensión al perceptrón simple y es uno de los tipos de red neuronal más conocido y utilizado, esta red se muestra en la figura 3. El perceptrón multicapa tiene una o más capas entre las capas de entrada y salida, estas capas que no están directamente conectadas al entorno son llamadas ocultas [12]. Este tipo de red es de aprendizaje supervisado y es de alimentación adelante, utiliza el algoritmo de retro propagación con deseno gradiente para su aprendizaje. Debido a su estructura

extendida, este perceptrón puede resolver cualquier operación lógica, y generalizar cualquier tipo de función.

### **Algoritmo de Retro propagación con Descenso de Gradiente**

El algoritmo de retro-propagación es uno de los más conocidos e implementados para los perceptrones multicapa [12]. El algoritmo utiliza la técnica de descenso por gradiente para encontrar el mínimo de la función de costo que mide el error del sistema como una función diferenciable de los pesos. El enfoque estocástico tiene la ventaja de permitir una amplia exploración de la superficie de costo. Los patrones de entrenamiento son presentados a la red en orden aleatorio, modificándose los pesos luego de presentar cada patrón [15]. Se basa en minimizar la diferencia entre la salida deseada y la salida real.

### **Entrenando la Red Neuronal**

Los siguientes pasos describen la forma en que una red neuronal aprende:

- Se inicia la red neuronal con valores aleatorios para los pesos sinápticos, valores decimales del 0 a 1.
- Presentarle a la red la imagen en forma de vector y propagar la actividad de forma hacia delante desde la capa de inicio a las capas ocultas y finalmente a la capa de salida.
- Calcular el valor de error (E) de cada neurona en la capa de salida. La salida (Y) de la neurona menos el valor deseado (D) ecuación 4.

$$E_i = Y_i - D_i \quad (4)$$

- Calcular el valor delta  $\Delta$  de cada neurona en la capa de salida ecuación 5, este para actualizar los pesos sinápticos a esta neurona.

$$\Delta_i = Y_i (1 - Y_i) E_i \quad (5)$$

- Se retro-propagan los valores delta de las neuronas en la capa de salida a las capas ocultas para calcular sus propios valores delta ecuación 6.

$$\Delta_i = Y_i (1 - Y_i) \sum Y_k W_k \quad (6)$$

- Se actualizan el bias ecuación 7 y los pesos sinápticos ecuación 8 de todas las neuronas. Donde  $\epsilon$  es la tasa de aprendizaje y  $X$  se refiere a la salida de la neurona emisora a esta o sea una señal de entrada.

$$b_{i+1} = b_i + \epsilon \Delta \quad (7)$$

$$W_{i+1} = W_i + \epsilon X \Delta_i \quad (8)$$

- Se calcula el error promedio cuadrado MSE para esta imagen ecuación 9.

$$mse = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (Y_i - D_i)^2 \quad (9)$$

- Repetir los pasos del 2 al 6 hasta agotar todas las imágenes en el conjunto de entrenamiento. Con esto termina una época y se calcula el MSE promedio de la época.
- Si el MSE promedio de la época es menor al umbral definido por el usuario el entrenamiento termina, por lo contrario se inicia otra época con el paso 2.

### 3. Metodología

Esta sección describe los pasos que se siguen en el proceso de desarrollo del trabajo presentado.

#### Proceso General

Los siguientes pasos definen el proceso general del proyecto:

- Se hizo la adquisición del corpus de datos. Se pidió a personas diversas que proporcionaran muestras de dígitos manuscritos. Esto con el fin de construir un corpus con suficiente variedad.
- Se separó el corpus de datos en dos conjuntos. El conjunto de entrenamiento que corresponden al 90% del corpus de datos y el conjunto de pruebas que corresponde al 10% del corpus.
- Se aisló cada dígito de las hojas y se les aplicó procesamiento de imagen de forma individual con los filtros de cropping, redimensión, y simplificación (binarización). Cada imagen de dígito contiene un metadato que dicta que dígito representa para los fines del entrenamiento.

- Se propusieron varias configuraciones de topología de red para encontrar la más óptima al problema de reconocimiento de dígitos manuscritos.
- Se entrenó cada red neuronal con su configuración de topología con el algoritmo de retro-propagación, dándole el conjunto de entrenamiento como su entrada.
- A cada red neuronal entrenada se le aplicó la decodificación o prueba con el conjunto de datos de prueba donde se recolectó el porcentaje de reconocimiento de cada topología.

### **Muestras de Dígitos Manuscritos**

Para que la red neuronal pueda clasificar a un dígito, primeramente, se tiene que entrenar la red con varias muestras que representen a todo el conjunto de dígitos que se van a clasificar. En este sistema se busca poder clasificar a los dígitos manuscritos del cero al nueve y por tanto se requiere de un conjunto de muestras de dígitos lo suficientemente grande para poder reconocer las variaciones en la forma de escribir de la gente y las mismas variaciones en la forma de representar un dígito. En este proyecto se obtienen las imágenes de entrada de modo offline.

Se decidió recolectar el conjunto de muestras de dígitos a mano. Se les pidió a sesenta cinco personas que escribieran a mano dos renglones con los dígitos del cero al nueve, estas personas fueron alumnos de dos salones. En total se recolectaron las diez hojas de trece renglones cada una, cada renglón teniendo los dígitos del cero al nueve, esto dio un total de 1300 muestras o 130 muestras de cada dígito. La figura 4 muestra una de las hojas que se recolectó con varias de las variaciones de los dígitos de diferentes personas.

Las hojas con los dígitos manuscritos fueron escaneadas, dando como resultado un conjunto de imágenes de 1664 x 2163 píxeles. Estas imágenes se convirtieron a escala de gris con el programa Photoshop y luego se les aplicó un threshold de 190, esto para reducir el ruido del escaneo y para limitar los grises a blanco o negro. Esto con el fin de dejar las imágenes con el conjunto de muestras listas para el uso del sistema de este proyecto.





Figura 4. Hoja con Dígitos Manuscritos.

## 4. Desarrollo

### Diseño e Implementación del Sistema de OCR con Red Neuronal MLP

El sistema de OCR se diseñó e implementó bajo el paradigma de orientación a objetos (OOP), con este enfoque cada neurona es un objeto, la red es un objeto, cada capa es un objeto, etc. La implementación se realizó en el lenguaje de programación Java y el interfaz gráfico con JavaFX.

En este sistema se utilizan los filtros de auto-cropping, normalización y binarización para el procesamiento de las imágenes que contienen el dígito a reconocer. El último filtro resulta en una imagen simple de tamaño 5x7 píxeles. El desarrollo de los filtros de imagen no estuvo dentro del alcance de este proyecto y por tanto estos filtros no se desarrollaron en este proyecto y fueron utilizados de una librería por Jeff Heaton [17].

Este sistema toma estas imágenes ya filtradas como su entrada en la fase de entrenamiento y decodificación. La misma red se encarga de la extracción de características.

Las neuronas de la red inician con valores aleatorios para sus pesos de sinapsis y bias, utilizan la función Sigmoidea como su función de activación. Las neuronas cuentan con dos arreglos, uno contiene las referencias a neuronas en la capa anterior, el otro arreglo las referencias a las neuronas en la capa que sigue. Para generar los valores aleatorios de los pesos, el valor inicial, se utiliza el Método de Congruencia Lineal [16] como se muestra en la (ecuación 4), está siendo una

implementación de la librería de Java. En este método  $x$  es el valor inicial o semilla,  $m$  es un módulo elegido,  $a$  y  $c$  son valores fijos, ecuación 10.

$$x_{n+1} = ax_n + c(\text{mod } m) \quad (10)$$

### Sistema Desarrollado

El interfaz gráfico GUI del sistema cuenta con varias pestañas que le permite al usuario realizar varias operaciones. El programa desarrollado le permite al usuario crear una red neuronal con la configuración que desee, claro solo configuraciones que pertenecen al perceptrón multicapa y hay una pestaña que muestra una visualización de ella, como se muestra en la figura 5.

El sistema cuenta con pestañas para: ver los pesos de las sinapsis antes y después del entrenamiento, una grafo que muestra cómo se entrenó la red neuronal figura 7, entrenar y probar la red neuronal con datos binarios figura 6, entrenar y probar la red con imágenes, y una pestaña que le permite aplicar filtros a las imágenes en forma de grupo (Batch Processing) figura 8.

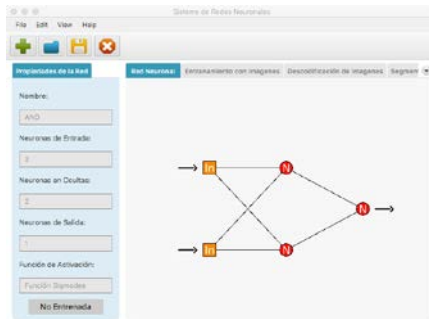


Figura 5 Visualizar la Red.



Figura 6 Entrenar la Red.

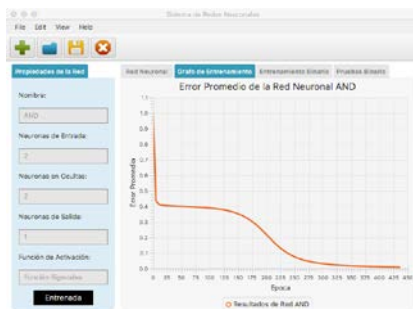


Figura 7 Resultado del Entrenamiento.

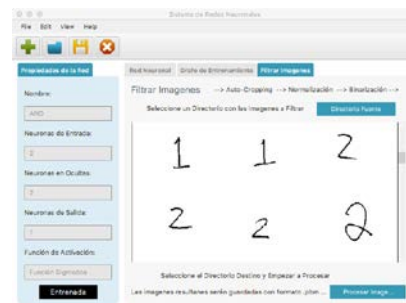


Figura 8 Entrenar con Imágenes.

El sistema fue diseñado e implementado primeramente para el reconocimiento de caracteres con una red neuronal como su motor, pero la flexibilidad del sistema es grande. Una ventaja del sistema es que se puede aplicar la red neuronal a otros usos. La red se puede entrenar para aprender funciones lógicas como la del AND, OR, XOR y Negación entre otras desde el mismo interfaz del sistema.

## 5. Resultados

El corpus de datos contiene un total de 1,300 muestras de dígitos manuscritos. Cada imagen es de 5x7 pixeles y se representa como un vector de 35 bytes. Cada topología de red cuenta con 35 neuronas en la capa de entrada, cada una corresponde a un byte del vector de entrada.

Cada topología de red también cuenta con 10 neuronas en la capa de salida, debido a que hay 10 dígitos o clases que se buscan clasificar. Para cada dígito le corresponde un patrón de salida, este patrón de salida especifica cual neurona debe estar encendida y cuales apagadas. La tabla 1 muestra estos patrones.

Tabla 1 Patrones de Salida.

Dígito	Patrón de Salida
0	1000000000
1	0100000000
2	0010000000
3	0001000000
4	0000100000
5	0000010000
6	0000001000
7	0000000100
8	0000000010
9	0000000001

Cada topología de red se entrenó con un conjunto de 1,170 muestras, lo cual se conoce como el conjunto de entrenamiento. El conjunto de entrenamiento consiste del 90% del conjunto total. Toda topología de red fue entrenada con una tasa de aprendizaje de 1.0 y por 10,000 épocas, una época siendo una iteración donde se le presentó el conjunto de entrenamiento entero.

En la etapa de pruebas (decodificación o reconocimiento), a cada topología de red se le hizo pruebas con 130 muestras, llamado el conjunto de pruebas, para encontrar el porcentaje de reconocimiento.

Las pruebas se hicieron con dos tipos de configuración de red. En la primera se hicieron las pruebas con arquitecturas donde se tenía solamente una capa oculta y variaban el número de neuronas en esta capa. La tabla 2 muestra los resultados con estas arquitecturas. La tabla muestra la configuración de topología, el porcentaje de reconocimiento de la red ya entrenada y el último error fue calculado con el error cuadrático medio (MSE) en la última época del entrenamiento. Se puede ver que las arquitecturas del 2 al 5 dieron resultados buenos, donde la quinta da el mayor resultado de porcentaje de reconocimiento. Se debe destacar que la arquitectura 5 dio el mejor porcentaje de reconocimiento de todas las pruebas con un 84.62%. La arquitectura 1 no convergió en algo y por tanto no reconoció ningún carácter.

Tabla 2 Topologías de Redes Neuronales de Una Capa Oculta.

Arquitectura	Topología	Porcentaje Reconocimiento	Ultimo Error MSE
1	35x70x10	0%	4.5
2	35x35x10	81.45%	0.008557006
3	35x17x10	81%	0.024637074
4	35x15x10	80.76%	0.034835098
5	35x12x10	<b>84.62%</b>	0.024740543

La figura 9 muestra cómo se disminuyó el error total de la red conforme se va entrenado. Como se puede ver en la figura no fue necesario entrenar la red por 10,000 épocas, las varias redes ya habían convergido antes de 4,000 épocas.

En la segunda configuración de red se hicieron las pruebas con arquitecturas donde se tenía dos capas ocultas y solo variaban el número de neuronas en estas, pero siempre con el mismo número en las dos capas. La tabla 3 muestra los resultados de estas. Como se puede ver en la tabla, ninguna topología dio buenos resultados. La arquitectura 3 obtuvo mejores resultados pero el 24% de

reconocimiento no es muy útil. La arquitectura 1 no convergió y no pudo reconocer algún carácter.



Figura 9 Resultados de Entrenamiento de Topologías de Una Capa Oculta.

Tabla 3 Topologías de Redes Neuronales de Dos Capas Ocultas.

Arquitectura	Topología	Porcentaje Reconocimiento	Ultimo Error MSE
1	35x35x35x10	0%	0.505441469
2	35x17x17x10	10%	0.15272143
3	35x15x15x10	<b>24%</b>	0.106048881
4	35x12x12x10	10%	0.27263727

La figura 10 muestra cómo fue cambiando el error total de cada red conforme fue avanzando el entrenamiento. La primera red, la de 35x35x35x10, fue disminuyendo su error, pero en las 10,000 épocas que tuvo no convergió. Las demás redes iniciaron con un error bajo y luego fue incrementando el error en vez de disminuir y tuvieron muchas oscilaciones



Figura 10 Resultados de Entrenamiento de Topologías de Dos Capas Ocultas.

## **6. Conclusiones**

Se entrenó la red neuronal con varias topologías para encontrar la configuración más adecuada para el reconocimiento de dígitos manuscritos. La topología en la cual se tiene lo doble de neuronas de entrada en una sola capa oculta, 35x70x10, no converge en algo y por tanto no reconoció ninguno de los dígitos que se le presentaron en la etapa de calificación.

Las topologías de una sola capa oculta con neuronas entre 35 y 12 por lo regular dieron buenos porcentajes de reconocimiento. Pero se debe admitir que ninguna topología de red obtuvo un porcentaje de reconociendo mayor al 85%.

Las topologías de red con más de una capa oculta no dan buenos resultados, por lo regular inician con un error total pequeño y luego conforme va avanzando el entrenamiento el error incrementa en vez de disminuir y por tano no convergen. Esto se debe en que en la fase de aprendizaje con el algoritmo de descenso de gradiente la red entra en un mínimo local del cual no se pueden salir a encontrar el mínimo global.

En un trabajo futuro se puede añadir una fase llamada pre-entrenamiento, esto con el fin de incrementar el porcentaje de reconocimiento. Esta fase de pre-entrenamiento utiliza algoritmos que previenen que una red entre en un mínimo local en su entrenamiento con el algoritmo de retro-propagación con descenso de gradiente.

En el reconocimiento de caracteres con redes neuronales existe una fase llamada extracción de características. En esta fase se utilizan algoritmos que extraen información importante de las imágenes, esto con el fin de mejorar el porcentaje de reconocimiento e incrementar la eficiencia de entrenamiento ya que se puede reducir el número de neuronas de entrada.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] Y. Perwej, A. Chaturvedi, "Neural Networks for Handwritten English Alphabet Recognition". *International Journal of Computer Applications*. Vol. 20. No. 7. April 2014.

- [2] A. Pal, D. Singh, "Handwritten English Character Recognition Using Neural Networks," *International Journal of Computer Science & Communication*. Vol. 1. No. 2. July-December 2010.
- [3] C. Patel, "Handwritten Character Recognition Using Neural Networks". *International Journal of Scientific & Engineering Research*. Vol. 2. No. 5. May 2011.
- [4] J. J. Castaneyra-Matus, Reconocimiento de Dígitos del Código Postal Mexicano Mediante Redes Neuronales Artificiales. Tesis de Licenciatura. México: Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- [5] G.R. Cónstenla, Reconocimiento Óptico de Dígitos con Redes Neuronales. Tesis de Doctorado, Argentina: Universidad del Belgrano. 2010.
- [6] C.J. Sánchez-Fernández, V.S. Consuegra, Reconocimiento Óptico de Caracteres (OCR). Madrid, España: Universidad Carlos III.
- [7] Y. Perwej, A. Chaturvedi, "Neural Networks for Handwritten English Alphabet Recognition". *International Journal of Computer Applications*. Vol. 20. No. 7. April 2014.
- [8] Umal Patel, "An Introduction to the Processo of Optical Character Recognition," *International Journal of Science and Research*. Vol. 2. No. 5. May 2013.
- [9] N. Casillas Gil, Sistema Basado En Redes Neuronales Para El Reconocimiento De Dígitos Manuscritos. Tesis de Licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, España. 2012.
- [10] Tim Klassen, Towards Neural Network Recognition of Handwritten Arabic Letters. Halifax, Nova Scotia, Dalhousie University. 2001. Canada.
- [11] F. Bortolozzi, A. de Souza Britto, L. S. Oliveira, M. Morita, "Recent Advances in Hadwriting Recognition". 2006.
- [12] V. Sandu and Florin Leon, Recognition of Handwritten Digits Using Multilayer Perceptrons. *Buletinul Insitutului Politehnic Din Iasi*. 2009.
- [13] D. Kriesel, A Brief Introduction to Neural Networks. Germany: University of Bonn. 2005.

- [14] Christos Stergiou and Dimitrios Siganos. NEURAL NETWORKS. [https://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise\\_96/journal/vol4/cs11/report.html#Contents](https://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html#Contents).
- [15] Leticia María Seijas, Reconocimiento de patrones utilizando tecnicas estadísticas y conexionistas aplicadas a la clasificación de dígitos manuscritos. Tesis de Doctorado, Universidad de Buenos Aires. 2011. Buenos Aires, Argentina.
- [16] Weisstein, Eric W. "Linear Congruence Method." From MathWorld--A WolframWeb. <http://mathworld.wolfram.com/LinearCongruenceMethod.html>.
- [17] Handwriting Recognition, Jeff Heaton. <http://www.jeffheaton.com>. Febrero, 2016.
- [18] H. A. Legal-Ayala, J. Facon, "Image segmentation by learning approach". In Proceedings of the 7th International Conference on Document Analysis and Recognition. Vol.2. 2003. Pp 819.
- [19] Y. C. Jhing-FaWang, "Locating the destination address block on images of complex mail pieces". Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2001.
- [20] J. J. Hull, S. N. Srihari, L. Kuan, P. Cullen, P. Palumbo, "A blackboard-based approach to handwritten Zip code recognition". In Proceedings of 3rd United States Postal Service Advanced Technology Conj. 1988. Pp. 1018-1032.

## **8. Autores**

Juan Manuel Martínez Cabrera es alumno de la Licenciatura en Ingeniería de Software de la Universidad Autónoma de Zacatecas.

Dr. Aldonso Becerra Sánchez es Ingeniero en Sistemas Computacionales, tiene la Maestría en Ingeniería con orientación en Computación, y título de Doctor en Educación por parte de la Universidad Autónoma de Durango.

M.I.A. Santiago Esparza Guerrero es Ingeniero Eléctrico, tiene la Maestría en Informática Administrativa por parte de la Universidad Autónoma de Durango.



Dr. Gustavo Zepeda Valles es Ingeniero en Sistemas Computacionales, tiene la Maestría en Informática Administrativa, y título de Doctor en Educación por parte de la Universidad Autónoma de Durango.

M.C Uriel Ramírez-García Correa es Licenciado en sistemas Computacionales y Administrativos, tiene la Maestría en Ciencias por parte del Tecnológico de Monterrey.

## **SIDESIM-O: HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE MODULADORES $\Sigma\Delta$ BASADA EN “OCTAVE”**

***Ximena Victoria Bouzas Munguía***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ximebomu@hotmail.com*

***Javier Alducin Castillo***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ximebomu@hotmail.com*

***Juan Jesús Ocampo Hidalgo***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ximebomu@hotmail.com*

***Iván Vázquez Álvarez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*ximebomu@hotmail.com*

### **Resumen**

En este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta para la simulación a nivel sistema de moduladores Sigma-Delta de alto orden y de un solo bit realizado en tiempo discreto usando técnicas de capacitor conmutado. En contraste con otros métodos, aquí se propone el uso de software libre, en particular del programa “Octave”, como plataforma para crear el simulador. El funcionamiento del programa desarrollado se compara, mediante la simulación de dos arquitecturas, con el de un programa comercial, obteniéndose resultados satisfactorios. El uso de software libre evita problemas tales como la piratería de programas o la adquisición de licencias de alto costo.

**Palabra(s) Clave(s):** Conversión A/D, Modulación Sigma-Delta, Simulación a nivel sistema

## 1. Introducción

Desde hace muchos años existe la tendencia en utilizar señales digitales en lugar de analógicas, ejemplo de ello fue diciembre de 2015, mes en que México sufrió el llamado “apagón analógico”, a partir de entonces, las televisiones que captan señales analógicas han dejado de ser capaces de desmodular las señales de televisión, ya que ahora son digitales. Para que estas televisiones puedan decodificar dichas transmisiones es necesario agregar unos dispositivos que conviertan la señal y así volver a hacer útil al televisor.

Las señales de información provenientes de sensores o transductores de audio, nivel de luz, PH, presión, temperatura, etc., son del tipo analógico, las cuales, se deben de modificar para convertirlas en una señal digital y de esta manera poder ser procesadas digitalmente. El tratamiento digital de las señales permite expresar una propiedad o un atributo físico de la misma, facilitando el cálculo numérico de diversos parámetros existentes en cada conjunto de señales, a través del uso de procesadores digitales. Para realizar la conversión de una señal analógica a digital es necesaria la implementación de un convertidor analógico-digital (ADC).

Existen principalmente dos familias de convertidores, la primera de ellas es la de ADC's que funcionan a la frecuencia de muestreo indicada por el teorema de Nyquist. El otro tipo de ADC es aquel que realiza un muestreo muy superior al indicado por la frecuencia de Nyquist, a este tipo de convertidores se les llama ADC Sigma-Delta ( $\Sigma\Delta$ ).

Los ADC  $\Sigma\Delta$  están basados en tres operaciones:

- Sobre muestreo: En estos ADC's se utiliza una frecuencia de muestreo que es usualmente 128, 256, o 512 veces mayor que la frecuencia de Nyquist. A este factor de aumento en la frecuencia de muestreo se le llama *factor de sobre muestreo* (OSR).
- Cuantificación de la señal: La cuantificación es una operación inherente a cualquier ADC. Es un proceso no-lineal y no-reversible, donde un intervalo continuo de valores de amplitud, es transformado en un conjunto finito de códigos digitales de salida. Aquí se introduce una pérdida de información que se modela como un ruido de cuantificación.

- Conformado de ruido: es un filtrado del ruido de cuantificación en la banda de interés.

Debido al uso del sobre muestreo y conformado de ruido, se tiene una mejora significativa de la razón señal a ruido (SNR) del sistema dentro del ancho de banda útil del convertidor, por esta razón, este tipo de convertidores son una alternativa efectiva para convertir señales con un alto número de bits. Para un ADC  $\Sigma\Delta$  ideal, de orden  $n$ , la SNR está dada por la ecuación 1.

$$SNR = \frac{3(2n+1)OSR^{2n+1}}{2\pi^{2n}} \quad (1)$$

Conforme fue aumentando el uso de los ADC  $\Sigma\Delta$ , también fue creciendo el uso de herramientas computacionales para la simulación, diseño y análisis de estos.

Dada la naturaleza de los moduladores  $\Sigma\Delta$ , cuya base es el sobre muestreo y el conformado de ruido, si dicha simulación se llevase a cabo en un programa de simulación de circuitos tal como lo es Spice (ver figura 1), se requeriría de un gran tiempo de análisis por computadora: Spice ejecuta su simulación a nivel transistor, es decir, para poder generar la ecuación de algún bloque de circuito se usan todos los elementos que lo conforman. Por ejemplo, un interruptor CMOS, el cual utiliza cuatro transistores, luego entonces, el programa produciría cuatro ecuaciones para modelarlo, en lugar de una. En la figura 1 se observa el diagrama esquemático conceptual de un modulador  $\Sigma\Delta$  de primer orden, realizado usando técnicas de capacitor conmutado (SC). Como se ve, el circuito consta de cuatro interruptores, un amplificador operacional (OPAMP) y un comparador (COMP).

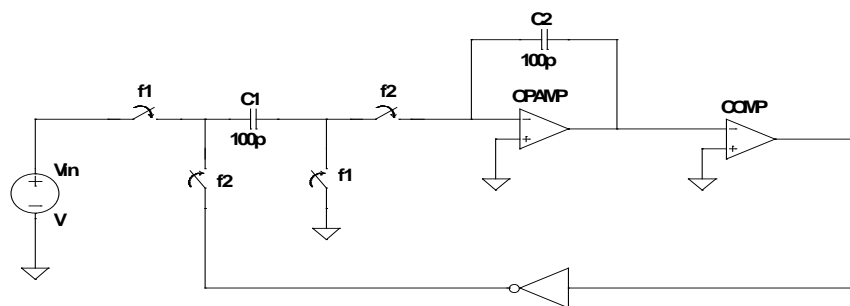


Figura 1 Diagrama esquemático de un modulador  $\Sigma\Delta$  de primer orden en SC.

Como se puede observar en la figura 2, un circuito comparador típico (LM111) consta de 24 transistores, más un OPAMP que tiene alrededor de 20 transistores y 16 transistores de los cuatro interruptores, esto se traduce en 60 ecuaciones, que se tendrán que analizar en cada incremento de tiempo del análisis transitorio que se realiza.

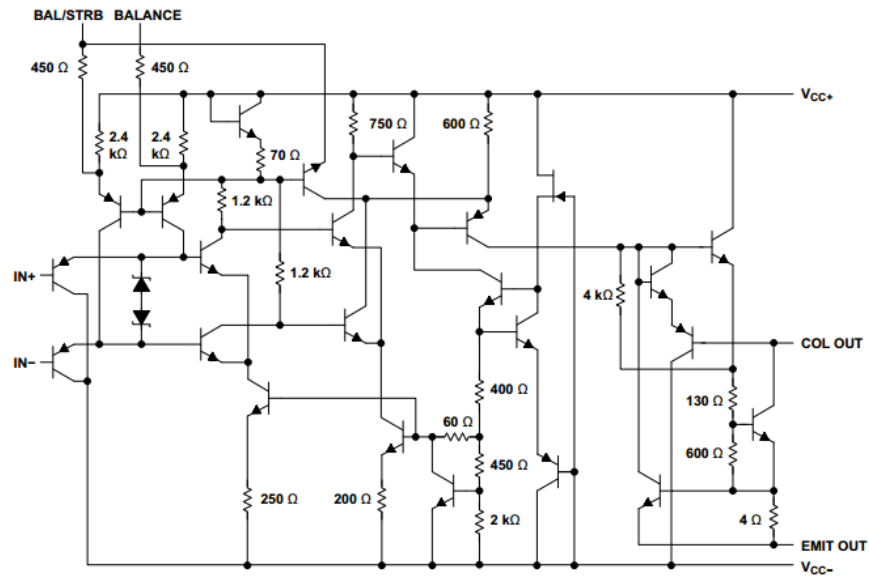


Figura 2 Diagrama esquemático interno del comparador LM111 [1].

Para realizar el análisis de la respuesta en frecuencia del modulador, se calcula la Transformada Discreta de Fourier (DTF) de la señal de salida, esto requiere un tiempo mínimo de simulación equivalente al de por lo menos 32 ciclos de la señal de entrada. Retomando el hecho del gran número de ecuaciones que se tiene que analizar, aunado al número de ciclos de entrada requerido por la DTF, tenemos como consecuencia un tiempo de simulación que puede llegar a ser de días, además de que los archivos de salida ocuparían una gran cantidad de memoria. Por las razones anteriormente expuestas se propone el uso de simulaciones de alto nivel, para realizar la adecuada modelación de este tipo de sistemas, las cuales, además de acelerar considerablemente el proceso de simulación, permiten analizar por separado los efectos que introducen las características no ideales de los elementos que conforman al modulador.

El desarrollo de herramientas de software destinadas a simular o analizar las señales obtenidas a través de los convertidores  $\Sigma\Delta$  está dominado por programas comerciales tal como la plataforma *MATLAB* de Mathworks.

En la literatura se encuentran varios trabajos relacionados: En [2] y [3] se propone una interfaz gráfica para el modelado de un ADC  $\Sigma\Delta$ , haciendo uso del toolbox de *MATLAB* y *SIMULINK*, el primero contiene una sola arquitectura de segundo orden, dicha interfaz es capaz de realizar la simulación de la arquitectura obteniendo el espectro de densidad de potencia (PSD), la estimación de SNR y ENOB, así como el tiempo transcurrido de análisis. Mientras que el segundo la interfaz calcula y corrige los valores para el vector del tiempo discreto, además de valores no ideales del tiempo continuo, el comportamiento real del OPAMP, jitter, exceso de retardos, etc.

En [4], se hace uso de *SIMULINK* para el modelado de un modulador de tercer orden, en aplicaciones de audio. El modulador analizado es de tipo no lineal, ya que adicionan ruidos debidos a efectos como slew rate, jitter, thermal noise, ganancia en DC y ruido blanco. En [5], se realiza una serie de bloques para modelar un ADC  $\Sigma\Delta$  de un circuito CMOS de  $0.5\mu\text{m}$ , se realizan dos simulaciones: una con condiciones ideales y otra con ruidos de comportamiento no lineal.

Se conoce que en la implementación de un modulador en capacitor-conmutado (SC), se usan diversas configuraciones de Amplificadores Operacionales (OPAMPS), los cuales tienen características tales como: ruido referido a la entrada, ganancia finita, ancho de banda finito, máxima razón de cambio y saturación de voltaje a la salida. Todo esto causa que el modulador  $\Sigma\Delta$  funcione de forma no ideal. Con base en lo anterior, en [6] se desarrolló un modelo en *SIMULINK* capaz de analizar las imperfecciones introducidas por los OPAMPS, lo cual se modeló en un modulador  $\Sigma\Delta$  de segundo orden. Se presentan como elementos de salida, gráficas de la SNR en función de cada uno de los parámetros de los OPAMPS.

En [7] se propone una serie de bloques creados en *SIMULINK* de un ADC  $\Sigma\Delta$  de segundo orden; para adicionar ruidos de efectos no lineales y obtener un modelado completo. Además, en [8] se modela un modulador de tercer orden

utilizando MATLAB, donde se compara cada integrador y se observa que no hay variación relevante. En [9], se hace uso de SIMULINK para el estudio de este trabajo, modelando el ruido que presenta el OPAMP cuando se tiene un modulador  $\Sigma\Delta$  utilizando el método en SC.

Otro trabajo relacionado es [10], donde se realiza el estudio de una arquitectura de alto orden para sensores de medición, utilizando la técnica de cuantificación de dos pasos. Los bloques que se modelaron contienen ruidos como lo son el ruido blanco, ganancia de corriente, tensiones de saturación, etc; así como diversas no idealidades, todo el proceso de cuantificación fue diseñado y simulado en MATLAB.

Como se observa, el modelado de alto nivel de este tipo de sistemas es común, pero hasta el momento, no se ha reportado la simulación del modulador  $\Sigma\Delta$  en un ambiente de software libre, ya que como se puede observar todos los métodos de modelado usan MATLAB, este tipo de plataformas brindan al usuario una gran cantidad de herramientas para el desarrollo de aplicaciones para análisis y simulación de sistemas de procesamiento de señales, sin embargo, adquirir una licencia con todos los módulos necesarios para el adecuado análisis de estos sistemas (en ambas plataformas) representa un alto costo.

*Octave* es un programa que contiene un lenguaje interpretado de alto nivel, destinado esencialmente a los cálculos numéricos. Dicha herramienta se encuentra dentro de la lista de paquetes de GNU. Este software brinda la capacidad de visualizar gráficas y manipular datos. Es utilizado normalmente a través de su interfaz de líneas de comandos, ya que no tiene un entorno visual donde se pueda programar, pero es esta misma falta de ventana de trabajo, la que permite que el procesamiento de datos sea muy rápido.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un conjunto de primitivas que permiten el modelado de un modulador  $\Sigma\Delta$  dentro del ambiente de trabajo *Octave*, su principal aportación radica en brindar una alternativa sin costo para la simulación de estos moduladores, además es expandible, es decir, se pueden agregar funciones para realizar algún análisis específico requerido. Otro aspecto importante es que el tiempo de respuesta es reducido (a diferencia del modelado

en programas como Spice), con lo cual, se puede simular en un tiempo razonablemente pequeño, una cantidad de ciclos de entrada tal que, la estimación de la DFT es confiable, y consecuentemente se pueden obtener buenos parámetros de SNR, la razón señal a ruido más distorsión (SNDR), y el número efectivo de bits (ENOB) a partir del análisis espectral. Como objetivo inicial, se presenta una herramienta de simulación de moduladores  $\Sigma\Delta$  ideales (*SIDESIM-O*), realizados en SC, de alto orden y un solo bit.

## 2. Desarrollo

En la figura 3 se muestra un diagrama a bloques con las etapas del desarrollo de la herramienta computacional. El principal objetivo es fungir como ayuda en el análisis y diseño de moduladores  $\Sigma\Delta$ , a partir de la lectura de un archivo creado por el usuario que describe la arquitectura del modulador que sea desea analizar, obteniendo los datos del comportamiento en tiempo y frecuencia del mismo, posteriormente, se estiman las métricas de rendimiento SNDR, SNR y ENOB.

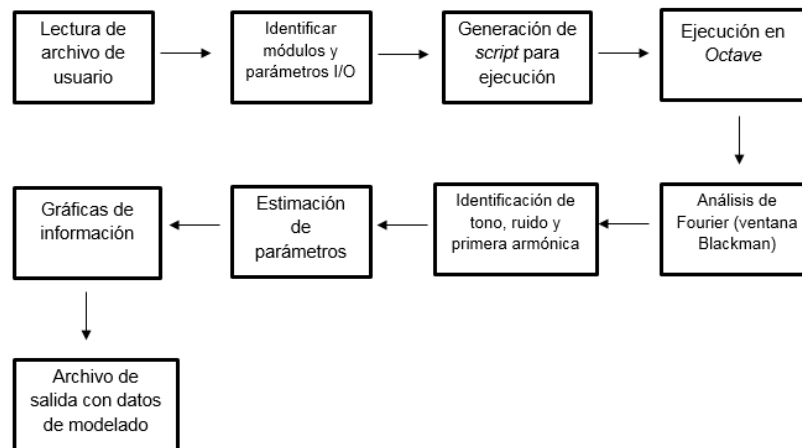


Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología propuesta del simulador desarrollado.

Esta herramienta computacional fue desarrollada para modelar una arquitectura, donde el usuario debe escribir un archivo de texto, indicando los módulos a usar con los parámetros de entrada y de salida correspondientes. Los módulos disponibles son:



- Tono o señal de entrada (tono): en este bloque se genera una señal sinusoidal a una frecuencia y amplitud variable, que servirá para analizar la arquitectura que el usuario diseñe (figura 4).



Figura 4 Entradas y salida del módulo tono o señal de entrada.

- Restador (dif): bloque que realiza la diferencia de dos señales (figura 5), se utiliza principalmente en la diferencia de una señal retroalimentada.

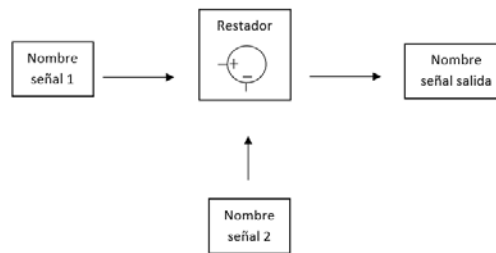


Figura 5 Entradas y salida del módulo restador.

- Constante (cte): realiza la ponderación o multiplicación por una constante (figura 6).

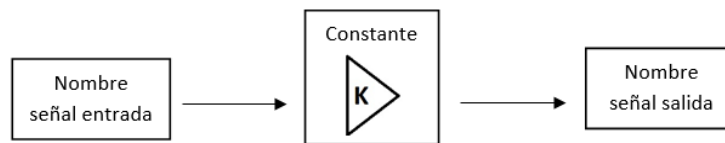


Figura 6 Entrada y salida del módulo constante.

- Integrador (int): realiza la integración en tiempo discreto de la señal (figura 7).

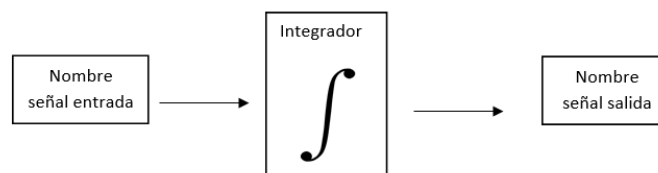


Figura 7 Entrada y salida del módulo integrador.

- Comparador (comp): en este bloque, se compara un valor de entrada ( $V_{EN}$ ) contra un valor de umbral ( $V_{UM}$ ) y determinar el valor de salida ( $V_{SAL}$ ) (figura 8) de acuerdo a la ecuación 2.

$$V_{SAL} = \begin{cases} 0, & V_{EN} < V_{UM} \\ 1, & V_{EN} \geq V_{UM} \end{cases} \quad (2)$$

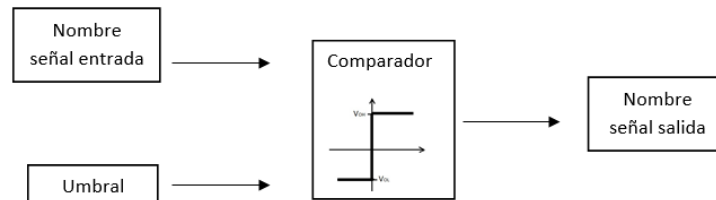


Figura 8 Entrada y salida del módulo comparador.

Produciendo valores de salida discretos que representan la salida del modulador  $\Sigma\Delta$ .

Otra operación necesaria en el diseño de moduladores de alto orden es la adición de señales, por lo tanto, se propone también crear un bloque sumador.

- Sumador (sum): realiza la suma de dos señales (ver figura 9), este bloque permite junto con el bloque de retardo crear esencialmente al integrador.

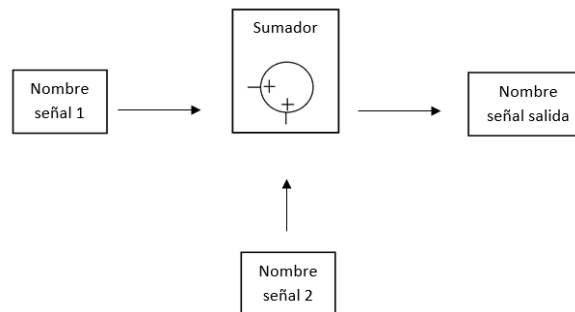


Figura 9 Entradas y salida del módulo Sumador.

El usuario, como en cualquier otro archivo de código, podrá ingresar todos los comentarios que requiera haciendo uso del símbolo '%', es necesario que el usuario guarde el archivo de descripción del modulador con una extensión “.ssd”, para que el texto se lea correctamente. Dicho archivo se lee, y a través de un intérprete, se identifican las funciones y los parámetros de entrada y salida de la arquitectura descrita por el usuario. El intérprete además reconoce y declara las

variables adicionales, necesarias para la correcta simulación del sistema, de tal forma que la identificación de módulos y su simulación se realizan sin la intervención del usuario.

Una vez que se identifican cada una de las funciones requeridas, la herramienta escribe un *script* que genera el código necesario en *Octave* para el modelado de la arquitectura, generando los resultados para su posterior análisis.

Para conocer el comportamiento en la frecuencia del modulador  $\Sigma\Delta$  propuesto, se analiza la salida a través de la transformada de Fourier usando el algoritmo Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando la ventana de Blackman, ya que para los moduladores  $\Sigma\Delta$  ésta muestra resultados óptimos.

Posteriormente se identifica, dentro de la respuesta en frecuencia, la señal de tono ( $S_s$ ), la primera armónica ( $S_A$ ), y el ruido ( $S_N$ ) en banda, estos datos son necesarias para calcular los parámetros de rendimiento del modulador: SNR, SNDR y ENOB de acuerdo con las ecuaciones 3, 4 y 5 respectivamente.

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} S_S^2}{\sum_{n=0}^{N-1} S_{SN}^2} \right) \quad (3)$$

$$SNDR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=0}^{N-1} S_S^2}{\sum_{n=0}^{N-1} S_{SN}^2 + \sum_{n=0}^{N-1} S_{SA}^2} \right) \quad (4)$$

$$ENOB = \frac{SNDR - 1.76}{6.02} \quad (5)$$

Finalmente, la herramienta brinda un archivo de datos, el usuario puede elegir la información que desea conocer, por ejemplo: el tiempo de simulación, los datos de la salida de cada elemento, etc. Además de presentar el comportamiento en frecuencia de la arquitectura analizada, esto para que el usuario observe dicha respuesta y tenga además de las métricas de rendimiento, elementos para visualizar el comportamiento de la arquitectura.

### 3. Resultados

Para observar y mostrar que la herramienta *SIDESIM-O* cumple los objetivos planteados, se comparan los datos obtenidos a través de la herramienta

desarrollada con los datos obtenidos en SIMULINK (MATLAB) al simular dos arquitecturas en ambas plataformas.

La primera arquitectura es de primer orden (figura 10), este modulador fue simulado usando un tono con amplitud de 0.7245 volts, frecuencia de 61 Hz, frecuencia de muestreo ( $f_s$ ) de 250kHz, número de muestras ( $m$ ) de 1250000 (se simulan 30 ciclos del tono) y un nivel de offset de 0.75 volts. Suponiendo un ancho de banda de 125Hz, la  $f_s$  produce un  $OSR$  de 1000. Los elementos que conforman esta arquitectura son: un punto de resta, de la señal de entrada  $x(z)$  con la señal de salida  $y(z)$ , un integrador ideal y un comparador, donde el nivel bajo es 0 y el nivel alto es 1.5 teniendo como nivel de referencia 0.75 volts.

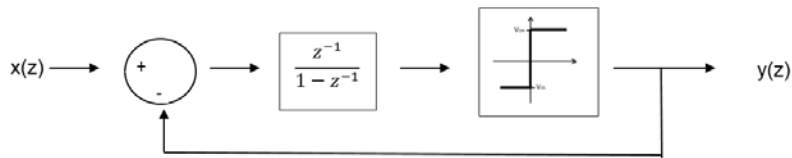


Figura 10 Diagrama a bloques de arquitectura de primer orden.

El procesamiento de datos, así como el análisis en frecuencia del modulador, fue realizado en 200 segundos, en un equipo de cómputo con un procesador Intel Quad Core de 2.4 GHz y 2 G de RAM. En la figura 11, se observa el comportamiento en frecuencia de la señal de salida de la arquitectura modelada, la gráfica de color azul representa la respuesta en frecuencia del modulador  $\Sigma\Delta$  modelado en *SIDESIM-O*, y dentro de la misma, la gráfica de color rojo es el mismo modulador simulado en SIMULINK. El comportamiento es idéntico, el ruido de baja frecuencia muestra niveles semejantes, la presencia del tono a 61 Hz, así como de armónicas y ruido en frecuencias altas coinciden plenamente.

En la tabla 1, se muestran las métricas de desempeño estimadas, se observa que la variación en SNR y SNDR, obtenido con SIMULINK y *SIDESIM-O* es de 0.108. El valor teórico de SNR se obtiene a partir de la ecuación 1, con  $n=1$  y  $OSR=1000$ . La estimación de las métricas se realizó, con el mismo script y los mismos parámetros, generando valores muy cercanos entre sí.

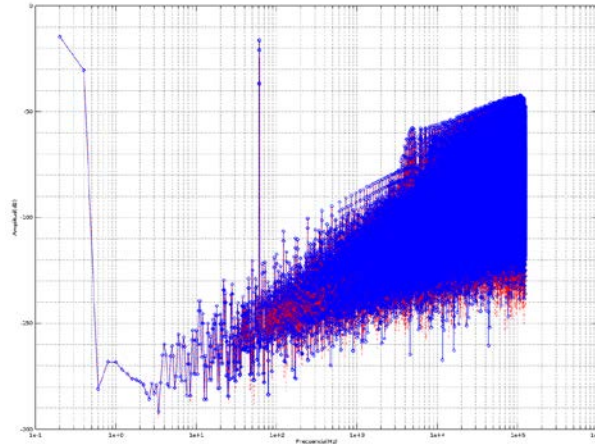


Figura 11 Frecuencia de la señal de salida de la arquitectura modelada.

Tabla 1 Parámetros de rendimiento de la arquitectura de primer orden.

Herramienta	SNR	SNR (teórico)	SNDR	ENOB
SIMULINK/MATLAB	89.166	88.808	89.166	14.519
Octave	89.224	88.808	89.224	14.529

Una segunda arquitectura que se modeló en ambos ambientes para su comparación es la que se observa en la figura 12.

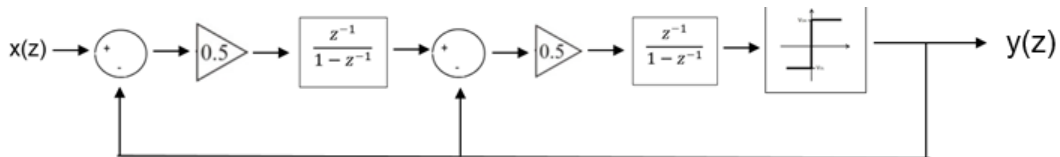


Figura 12 Diagrama a bloques de arquitectura de segundo orden.

Este modulador se simuló usando un tono con amplitud de 0.8 volts, frecuencia de 61Hz,  $f_s = 250\text{kHz}$ ,  $m=1250000$  (se simulan 30 ciclos) y un offset de cero volts, a diferencia del anterior, este es un modulador de segundo orden, ya que contiene dos integradores con retardo. Para el cálculo teórico de la SNR se asumió el mismo ancho de banda de 125Hz,  $n=2$  y OSR de 1000.

Al igual que en la primera arquitectura, en la figura 13, se muestra el comportamiento en frecuencia del modulador  $\Sigma\Delta$  de segundo orden, como era de esperarse la atenuación del ruido de cuantificación es mayor.

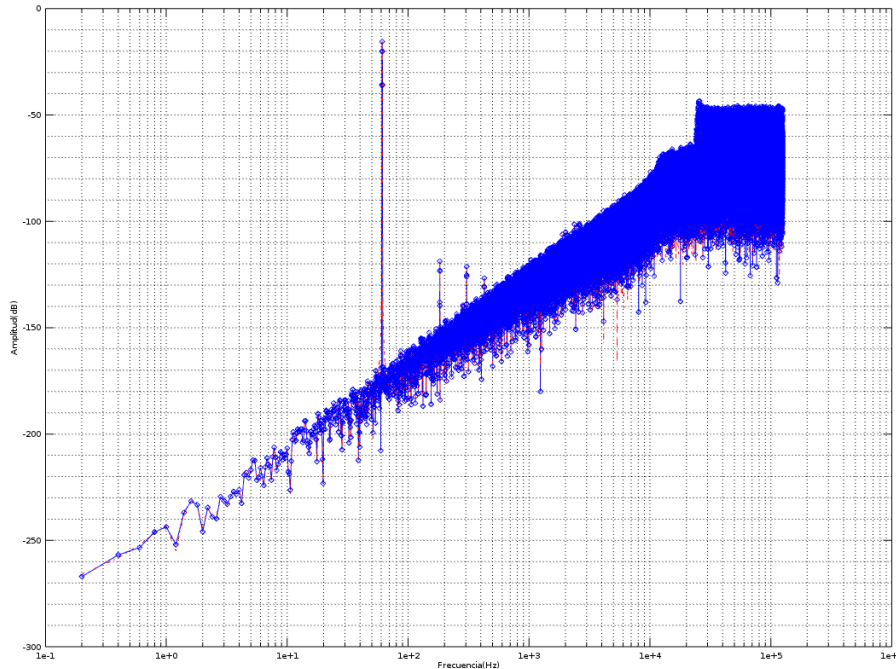


Figura 13 Respuesta en frecuencia de la arquitectura de segundo orden.

En la tabla 2, se comparan los parámetros de rendimiento para la arquitectura de segundo orden, se observa que las métricas obtenidas con la presente herramienta son superiores a las obtenidas con los datos obtenidos en SIMULINK, además el resultado del método propuesto, se acerca más el valor de SNR predicho por la ecuación 1, a su vez, el valor de ENOB, al depender del valor de SNDR, es mayor que el obtenido con SIMULINK.

Tabla 2 Parámetros de rendimiento arquitectura de segundo orden.

Herramienta	SNR	SNR (teórico)	SNDR	ENOB
SIMULINK/Matlab	120.73	138.86	120.73	19.763
Octave	128.74	138.86	128.74	21.094

#### 4. Discusión

Los datos obtenidos con la herramienta computacional *SIDESIM-O* desarrollada en este trabajo, son muy cercanos a los obtenidos en SIMULINK, tanto en frecuencia como en métricas de rendimiento para la arquitectura de primer orden. En el caso de la arquitectura de segundo orden, el comportamiento en frecuencia

es prácticamente idéntico (Fig. 13), sin embargo, en la estimación de las métricas de desempeño hay un incremento en el valor de los datos obtenidos con la herramienta de software libre en donde la SNR, SDNR y ENOB son superiores, con respecto a los datos estimados con SIMULINK. Esto puede ser indicio de que, en arquitecturas de alto orden, la simulación realizada en SIMULINK sea afectada por el redondeo de datos interno que maneja MATLAB, es posible solucionar el problema anterior al modificar las opciones de la configuración de redondeo y tolerancia absoluta en la simulación de SIMULINK en cada simulación.

Además, el valor de SNR calculado teóricamente con la ecuación 1, es más cercano con el estimado a partir de los datos de la herramienta propuesta, eso puede ser un indicio adicional de que los datos obtenidos con SIMULINK, sean afectados de manera interna por los ajustes de la máquina de simulación.

Es importante recalcar que, de acuerdo con los objetivos iniciales del trabajo, las arquitecturas simuladas son ideales, es decir, que no se ha incorporado ningún tipo de ruido de circuito, incertidumbre en el muestreo ni ganancia finita del amplificador operacional, es por eso que los valores de SNR y SNDR tanto en *SIDESIM-O* como en *SIMULINK* son relativamente altos, a diferencia de aquellos donde los ruidos son considerados en la simulación y cálculo de las métricas de desempeño.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó una herramienta de simulación de moduladores  $\Sigma\Delta$  de alto orden y de un solo bit realizado en *Octave*, usando software de libre distribución. El programa *SIDESIM-O* tiene la capacidad de leer un *script* que el usuario proporcione, reconocer cada una de las entradas, salidas y parámetros que contienen las funciones que se manden a llamar, para que, de esta manera, se escriban las funciones en el orden preciso de acuerdo al modulador  $\Sigma\Delta$  propuesto; además obtiene la respuesta en frecuencia y por último los parámetros SNR, SNDR y ENOB de la señal de salida del sistema. Todo con la mínima intervención del usuario, esto debido a que se creó un programa intérprete, ocasionando que el proceso de simulación de moduladores  $\Sigma\Delta$  sea transparente

para el usuario, ya que sólo tiene que escribir los bloques que requiere para el modelado de una arquitectura, sin escribir código alguno.

Debido a las diferencias encontradas en las métricas en la arquitectura de segundo orden se puede proponer un trabajo futuro: investigar cuáles son las razones que produzcan una diferencia en la estimación de los parámetros, simulando arquitecturas de tercer y cuarto orden, y a través de un análisis estadístico adecuado estudiar dicho comportamiento.

Con la ayuda de la herramienta computacional *SIDESIM-O* el usuario sólo tendrá que indicar el nombre del archivo, para que, de esta manera, comience el análisis. Es necesario destacar, que dicha herramienta puede ser mejorada, al incluir los diferentes tipos de limitantes no ideales que existen en el circuito real, para que de esta manera se le proporcione al usuario una información completa del desempeño del modulador cuando se implemente con elementos reales.

Además, el usuario podrá estudiar el comportamiento de una arquitectura de interés sin la adquisición de una licencia o licencias, es posible también que el usuario pueda modificar la herramienta desarrollada, por lo que también es adaptable, de fácil uso y de libre distribución.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] LM111 datasheet. <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/lm311-n.pdf>. Junio 2016.
- [2] A. K. Sahu, V. K. Chandra, G. R. Sinha, "Improved SNR and ENOB of Sigma-Delta Modulator for Post Simulation and High Level Modeling of Built-in-Self-Test Scheme". *International Journal of Computer Applications*. 2014. Pp. 11-14.
- [3] A. Buhmann, M. Keller, M. Maurer, M. Ortmanns, Y. Manoli, DISCO - A toolbox for the discrete-time simulation of continuous-time sigma-delta modulators using MATLAB. 2007. Pp. 1082-1085.
- [4] N. Sirdeshpande, R. Desai, Simulink Based Approach for Modelling Of Third Order Sigma Delta Modulator For Audio Applications. 2015.



- [5] R. Mingyuan, "The Design of High Performance, High Resolution Two-Order Delta-Sigma Modulator". *Sensors & Transducers*. Vol. 22. No. 6. 2013. Pp. 155.
- [6] S. Jaykar, P. Palsodkar, P. Dakhole, "Modeling of Sigma-Delta Modulator Non-Idealities in MATLAB/SIMULINK". 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 978-0-7695-4437-3/112011 IEEE DOI 10.1109/CSNT.2011.112
- [7] A. Dendouga, N. E. Bouguechal, S. Kouda, S. Barra, B. Lakehal, "Contribution to the modeling of a non-ideal Sigma-Delta modulator". *Journal of Computational Electronics*. Vol. 11. No. 4. 2012. Pp. 321-329.
- [8] M. Bashir, S. R. Patri, K. S. R. Krishnaprasad, "MATLAB/SIMULINK based time-domain behavioral modeling of multibit sigma-delta converters". In *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*. March 2016. Pp. 132-136.
- [9] F. Wu, Z. J. Chen, M. Zhao, D. Y. Xu, G. C. Shen, W. G. Lu, Y. C. Zhang, "A new op-amp noise model for switched-capacitor sigma-delta modulator in SIMULINK". *IEEE International Conference On in Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*. June 2014. Pp. 1-2.
- [10] L. Fucik, R. Vrba, "MATLAB Model of 16-bit Switched-capacitor Sigma delta Modulator with Two-step Quantization Process". *IEEE Transactions on Circuits and System*. 2006.

## 7. Autores

Ximena Victoria Bouzas Munguía es estudiante de Ing. en Electrónica en la UAM-Azcapotzalco, Ciudad de México, donde su trabajo de proyecto terminal es "Modelado en alto nivel de moduladores  $\Sigma\Delta$  usando *Octave*". Obtuvo el primer lugar en el área de Construcción de Prototipos en el XXII Congreso de Investigación CUAM-AcMor con el proyecto "Casa Telemática", Cuernavaca Morelos, en 2011. Actualmente es ayudante de investigación en el departamento de electrónica, en la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco

colaborando con el área de Instrumentación, procesamiento de señales y sistemas inteligentes. Sus intereses académicos incluyen el procesamiento digital de señales, así como el manejo, investigación e innovación de sistemas de control.

Javier Alducin Castillo recibió el título de Ing. en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco, Ciudad de México, México, en 2008, el grado de M. en C. en Ingeniería Biomédica en 2014 por la UAM-Iztapalapa, Ciudad de México, México, obteniendo la Medalla al Mérito Universitario 2014. Actualmente es profesor en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Sus tópicos de investigación incluyen procesamiento digital de señales e imágenes, análisis de EEG y conectividad funcional cerebral.

Juan Jesús Ocampo Hidalgo es doctor en ingeniería por la universidad de tecnología de Darmstadt, en Darmstadt, Alemania. Trabajó como diseñador de circuitos integrados CMOS analógicos y de señal mixta en AnaFocus S de RL en Sevilla, España, donde desarrolló circuitos integrados para lectura y conversión A/D para pixeles activos en tecnologías CMOS nanométricas. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en el Departamento de Electrónica de la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. Sus intereses académicos son el diseño de circuitos integrados CMOS analógicos y de señal mixta.

Iván Vázquez Álvarez obtuvo su título de título de Ing. en Electrónica por la UAM-A, Ciudad de México, México, en 1999, el grado de M. en C. en Ingeniería Eléctrica en 2004 por el CINVESTAV-IPN en Guadalajara, Jalisco, México, y el grado de Dr. en el 2006 por la Universidad Estatal de Moscú – Lomonosov, Federación Rusa. Actualmente es profesor en la Universidad Autónoma Metropolitana. Sus tópicos de investigación incluyen el modelado y simulación de sistemas mecánicos, los sistemas no lineales y el control aplicado a sistemas automotrices.

# **DISEÑO DE UN FILTRO DIGITAL PASA BAJAS DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN A PARTIR DE CIRCUITO RC**

***Armando S. Chipule Pérez***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*satielo.3000@gmail.com*

***Gerardo Águila Rodríguez***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*gerardo\_aguila03@yahoo.com.mx*

***Rubén Posada Gómez***

Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba  
*rposada@itorizaba.edu.mx*

## **Resumen**

En este artículo se presenta una metodología para realizar modelos matemáticos de filtros pasa baja de primero y segundo orden en tiempo discreto partiendo de la función transferencia de un circuito simple RC. Entre las ventajas de utilizar técnicas de procesamiento digital de señales resaltan la inmunidad a factores intrínsecos tales como temperatura ambiente, ruido electromagnético y acoplamiento entre componentes. De esta forma los sistemas de procesamiento de señales involucrados en lazos de instrumentación incrementan la estabilidad y robustez. En concreto este trabajo se centra en el diseño de filtros digitales pasa bajas que emulen el comportamiento de un circuito RC, así también se presenta la forma de implementar el C++ dicho filtro, estableciendo como parámetros principales la frecuencia de corte y el periodo de muestreo para su posterior aplicación en lazos de instrumentación.

**Palabra(s) Clave(s):** Digital, filtro, microcontroladores, pasa-bajas.

## **1. Introducción**

Un filtro por definición es un procedimiento utilizado para seleccionar cierta información y descartar otra, en procesamiento de señales se utilizan normalmente para, dependiendo de sus parámetros, llevar a cabo un proceso de discriminación en la señal de entrada, obteniendo una señal de salida con la información que ha dejado pasar [1], usados normalmente para eliminar ruido eléctrico, oscilaciones en la señal, o bien niveles de DC que no se requieren.

Los filtros digitales han ganado popularidad debido al amplio uso que se le ha dado a los microcontroladores, ya que el procesamiento digital de señales es una parte importante de todo sistema embebido. Existen dos grandes divisiones en cuanto a filtros digitales se refiere, los filtros de respuesta infinita al impulso (IIR por sus siglas en inglés) y los filtros de respuesta finita al impulso (FIR por sus siglas en inglés). Los filtros IIR en general son, más rápidos que los FIR y con menos elementos pero, ya que presentan retroalimentaciones, pueden llegar a ser inestables por lo que deben ser sometidos a análisis de estabilidad, los FIR por el contrario no presentan retroalimentación y por lo tanto son estables por definición [2], por el contrario presentan mayor complejidad computacionalmente hablando de los IIR por lo que existen una gran cantidad de métodos propuestos para reducir su complejidad [3].

Diferentes métodos son utilizados para obtener los modelos discretizados de funciones conocidas en tiempo continuo, como en [4], que plantea una metodología basada en utilizar la transformada Z bilineal para determinar ciertos coeficientes, y determinar la matriz de pascal de acuerdo al orden del filtro, este método es fácilmente programable, pero ya que implica utilización de operaciones matriciales resulta de difícil implementación en microcontroladores, ya que se deberían desarrollar todas las funciones para resolver operaciones matriciales o importar librerías que lo hagan; así mismo el procedimiento resulta bastante extenso para ser resuelto a mano.

La transformada Z es una herramienta útil en el procesamiento de señales digitales, ya que es posible realizar modelos matemáticos que representen el comportamiento de una señal que se encuentra en tiempo continuo, pero

discretizada, así mismo es posible realizar, mediante el análisis correcto, modelados de funciones transferencia que pueden ser implementadas mediante un microcontrolador, teniendo así un resultado muy similar al que se tendría con el mismo sistema hecho con dispositivos analógicos.

## 2. Desarrollo

### Filtro de Primer Orden

Dependiendo el tipo de señal que se tenga y lo que se desee tener, es como se elige el tipo de filtro a utilizar, ya sea un filtro pasa bajas, pasa altas, pasa banda, entre otros. En el caso de señales en las cuales existen componentes armónicas de determinada frecuencia que se desean eliminar para tener solo la componente de DC (tratándose de una señal en voltaje), lo ideal es hacerla pasar por un filtro pasa bajas.

Dentro de la gran variedad de configuraciones existentes para crear un filtro pasa bajas con dispositivos analógicos para una señal en voltaje, el más elemental es el circuito RC que se muestra (figura 1), se puede obtener un modelo matemático de este circuito bajo el concepto de impedancias complejas, obteniendo una función transferencia que da información acerca de la respuesta en frecuencia de dicho circuito, esto en el dominio de Laplace; sin embargo cuando se trata de una señal digital la estrategia a utilizar es diferente.

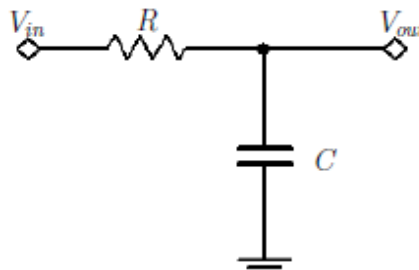


Figura 1 Filtro pasa bajas de primer orden analógico.

Existe una gran variedad de técnicas utilizadas para procesar señales digitales que no se estabilizan en ningún momento del tiempo, es decir que se encuentran oscilando constantemente, inclusive a muy baja frecuencia, en ese caso un simple

promediado de las muestras en dicha señal no es suficiente, a menos que se tomen suficientes muestras como para abarcar más de un ciclo de la señal, lo cual haría que el programa que se está ejecutando se vuelva muy lento, todo esto cambia si se utiliza un filtro de tiempo discreto por transformada Z.

Se puede realizar un modelado en el dominio Z partiendo de la función transferencia en Laplace de cualquier circuito analógico, como ya se dijo anteriormente, la transformada Z representa señales discretas, por lo que para poder aplicar la transformación primero se debe obtener una señal relacionada con dicho sistema, en este caso su respuesta a una entrada conocida, como puede ser una entrada de tipo escalón. Una vez aplicando la transformada Z a la señal de respuesta se puede obtener un cociente  $\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)}$ , es decir una función transferencia, que en este caso, al estar en el plano Z, se denomina función transferencia pulso.

La función transferencia en el dominio de Laplace de un circuito pasa bajas de primer orden se muestra en la ecuación 1.

$$\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)} = \frac{1}{RCs + 1} = \frac{\frac{1}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{\omega}{s + \omega} \quad (1)$$

Ahora para partir del modelo en Laplace al modelo en Z se debe, primeramente, obtener una ecuación de respuesta del sistema a una entrada conocida, como puede ser una entrada de tipo escalón unitario, por lo que la función de respuesta en Laplace queda ecuación 2.

$$V_o(S) = \left(\frac{\omega}{s + \omega}\right) \left(\frac{1}{s}\right) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \omega} \quad (2)$$

La ecuación 2 es una función que presenta la respuesta del filtro de primer orden analógico, a una entrada de tipo escalón, sobre la cual se puede aplicar el proceso de transformada Z mediante la propiedad de linealidad. La transformada Z de dicha función queda expresada como ecuación 3.

$$V_o(Z) = Z\left\{\frac{1}{s}\right\} - Z\left\{\frac{1}{s + \omega}\right\} = \frac{z}{z - 1} - \frac{z}{z - e^{-\omega T}} \quad (3)$$

Para obtener el cociente  $\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)}$  se factoriza de la ecuación 3, la transformada Z del escalón unitario usado como entrada, por lo tanto el cociente queda expresado como ecuación 4.

$$\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)} = \frac{1 - e^{-\omega T}}{z - e^{-\omega T}} \quad (4)$$

La ecuación 4 es la función transferencia pulso, correspondiente al filtro pasa bajas de primer orden, pero en este caso es de tipo digital. Por comodidad para el proceso siguiente, se expresará en forma de filtro digital, es decir, con exponentes negativos en la variable , ecuación 5..

$$\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)} = \frac{(1 - e^{-\omega T})z^{-1}}{1 - e^{-\omega T}z^{-1}} \quad (5)$$

Es bien sabido que en la notación de transformada Z,  $Z^{-n}$  indica retrasos en el tiempo equivalentes a  $Tn$  en donde T es el periodo de muestreo, por esta razón se expresa la ecuación 5, ya que de esta manera es más fácil observar su comportamiento en el tiempo, figura 2.

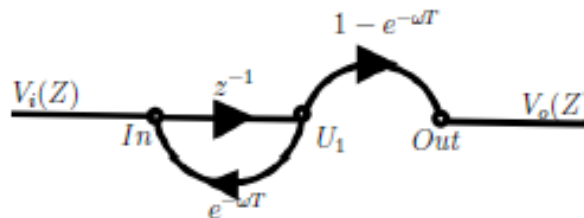


Figura 2 Gráfico de flujo de señal para el filtro pasa bajas de primer orden modelado.

Teniendo la función transferencia pulso del filtro se procede a aplicar un proceso de transformada Z inversa. Existen muchos métodos que se utilizan dependiendo de la aplicación. El método utiliza la ecuación de Mason, que normalmente sirve para calcular la función transferencia de diagramas a bloques, representándolo como diagrama de flujo de señal, pero en este caso se realizará un proceso inverso ya que se parte de la función transferencia para llegar al diagrama de flujo de señal. Ya que la función transferencia se encuentra en función de la variable Z y que, como se mencionó anteriormente, el exponente de esta indica retrasos en el

tiempo iguales a  $n$  periodos de muestreo, el diagrama de flujo de señal representará esos retrasos en el tiempo, así también con base en la ecuación de Mason[5] se puede determinar que existe una trayectoria directa entre la entrada y la salida:  $(1 - e^{-\omega T})z^{-1}$ , así como también un lazo cerrado:  $e^{-\omega T}z^{-1}$ . Con estos datos se puede proceder a crear un diagrama de flujo de señal que represente el comportamiento en el tiempo del sistema diseñado.

En el diagrama de flujo de señal correspondiente al filtro diseñado (figura 2), cada lazo tiene una ganancia definida por la función transferencia pulso, además se indican un conjunto de nodos que servirán para determinar ecuaciones necesarias en la implementación del sistema.

Se deben determinar ecuaciones para los nodos de entrada y salida, tomándolos como puntos de suma, y solamente los lazos que llegan a estos y el nodo del que parten dichos lazos.

El nodo de entrada queda expresado por ecuación 6.

$$In = V_i(Z) + e^{-\omega T}U_1 \quad (6)$$

Mientras que el nodo de salida se expresa como ecuación 7.

$$Out = (1 - e^{-\omega T})U_1 \quad (7)$$

Para la implementación de las ecuaciones 6 y 7 se debe tomar en cuenta que cada trazo marcado con una  $z^{-1}$  indica un retraso en el tiempo de un periodo de muestreo, por lo cual la señal se ira desplazando entre los nodos unidos por un  $z^{-1}$ , en otras palabras, en cada iteración se calcula un nuevo valor para el nodo de entrada con la señal muestreada ( $V_i(Z)$ ), se calcula el valor para la salida, se realiza el corrimiento de valores entre los nodos y se vuelve a iniciar el proceso en el siguiente muestreo.

### Filtro de Segundo Orden

Para el diseño de un filtro de segundo orden hay varias alternativas en cuanto a la metodología a seguir, las cuales pueden ser:

- Realizar todo el proceso descrito para el filtro de primer orden, sobre la función transferencia de un filtro de segundo orden.



- Tomar la función transferencia de un filtro de primer orden y colocar dos iguales en cascada, obtener la función transferencia resultante y realizar el proceso ya descrito.
- Tomar la función transferencia pulso del filtro de primer orden, colocar dos en cascada y realizar el proceso de transformada Z inversa sobre la función transferencia pulso resultante, con el diagrama de flujo de señal.
- Repetir las ecuaciones de entrada/salida y hacer que la salida del primer par sea la entrada del segundo.

Como es bien sabido, tanto en el dominio de Laplace como en el dominio Z, se puede poner sistemas en cascada, lo cual matemáticamente resulta en la multiplicación de sus funciones transferencia, todo esto es válido si ambos sistemas se encuentran modelados en el mismo dominio, es decir se pueden poner varias funciones transferencia en cascada, así como también varias funciones transferencia pulso en cascada, siempre y cuando se respete el dominio en el que se encuentran. Con base en lo anterior y sabiendo que ya se modeló anteriormente la función transferencia pulso de un filtro de primer orden, se opta por tomar dicha función, colocar dos en cascada y proseguir con la metodología descrita a partir de ahí.

Partiendo de la ecuación 5, se procede a colocar dos iguales en cascada, es decir, multiplicando entre si, o bien, elevando al cuadrado dicha ecuación.

$$\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)} = \left( \frac{(1 - e^{-\omega T})Z^{-1}}{1 - e^{-\omega T}Z^{-1}} \right) \left( \frac{(1 - e^{-\omega T})Z^{-1}}{1 - e^{-\omega T}Z^{-1}} \right) \quad (8)$$

De esta manera se vuelve más sencillo llegar a la función transferencia pulso del filtro de segundo orden, resolviendo la ecuación 8m quedando como se muestra en la ecuación 9.

$$\frac{V_o(Z)}{V_i(Z)} = \frac{(1 - 2e^{-\omega T} + e^{-2\omega T})Z^{-2}}{1 - 2e^{-\omega T}Z^{-1} + e^{-2\omega T}Z^{-2}} \quad (9)$$

Como resultado de este proceso se tiene la función transferencia pulso para un filtro de segundo orden, y se procede a dibujar su diagrama de flujo de señal (figura 3).

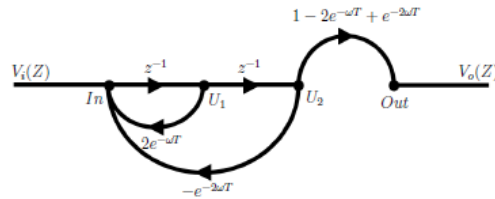


Figura 3 Diagrama de flujo de señal para el filtro pasa bajas de segundo orden.

Teniendo el diagrama de flujo de señal se pueden obtener las respectivas ecuaciones en entrada/salida para este nuevo sistema.

La entrada queda expresada por ecuación 10.

$$In = 2e^{-\omega T} U_1 - e^{-2\omega T} U_2 \quad (10)$$

Para la salida se tiene ecuación 11.

$$Out = (1 - 2e^{-\omega T} + e^{-2\omega T}) U_2 \quad (11)$$

La implementación es la misma que la descrita en el caso anterior, en cada iteración se deberán hacer corrimientos consecutivos de los valores del nodo In, el nodo U1 y el nodo U2 de modo que se comporte de la misma manera que como se describe en el diagrama de flujo de señal, existiendo un periodo de muestreo en atraso entre cada uno de dichos nodos.

### 3. Resultados

#### Simulación

Una forma de comprobar que el filtro funcionará correctamente puede ser observando su respuesta en frecuencia, a través de un diagrama de bode, y comparar el diagrama correspondiente a la función transferencia, con el correspondiente a la función transferencia pulso, para esto primeramente habría que proponer valores de frecuencia de corte, y en el caso del filtro de tiempo discreto también habría que incluir un valor para el periodo de muestreo (T), primeramente proponiendo valores para  $\omega$  y T.

Definiendo  $f=1\text{hz}$  y  $T=0.001\text{s}$ , se puede calcular el valor correspondiente de  $\omega = 6.2832$  los cuales pueden ser sustituidos en la función transferencia y función transferencia pulso quedando ambas mediante ecuaciones 12 y 13.

$$G1(s) = \frac{6.283}{s + 6.283} \quad (12)$$

$$G1(z) = \frac{0.006263z^{-1}}{1 - 0.9937z^{-1}} \quad (13)$$

Todo filtro pasa-bajas de primer orden en la frecuencia de corte presenta una magnitud de -3dB (figura 4a) y una fase de -45° (figura 4b); además una pendiente de atenuación de -20dB/Dec debida al polo simple existente en la función transferencia como se aprecia en la ecuación 12, de la misma manera para la función transferencia pulso equivalente mostrada en la ecuación 13, en la frecuencia de corte se presenta la magnitud antes mencionada (figura 5a) con la fase antes mencionada (figura 5b), que en el mismo sistema pero en tiempo continuo.

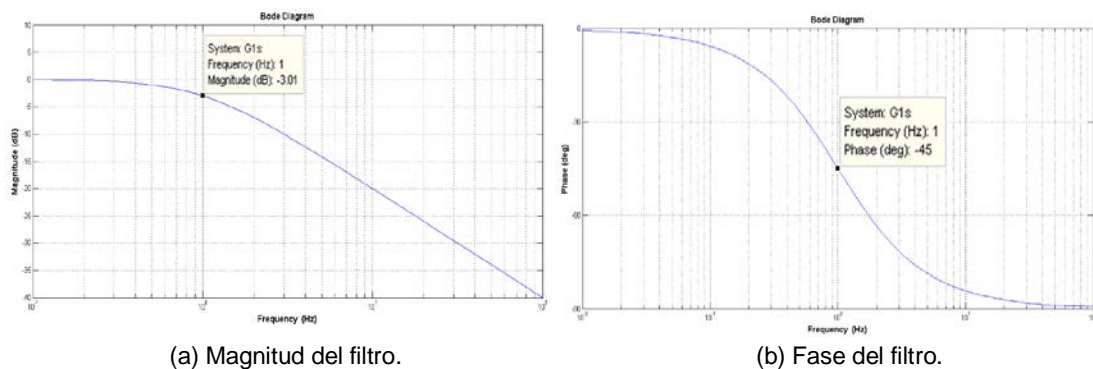


Figura 4 Bode del filtro de primer orden en tiempo continuo con frecuencia de corte f=1hz.

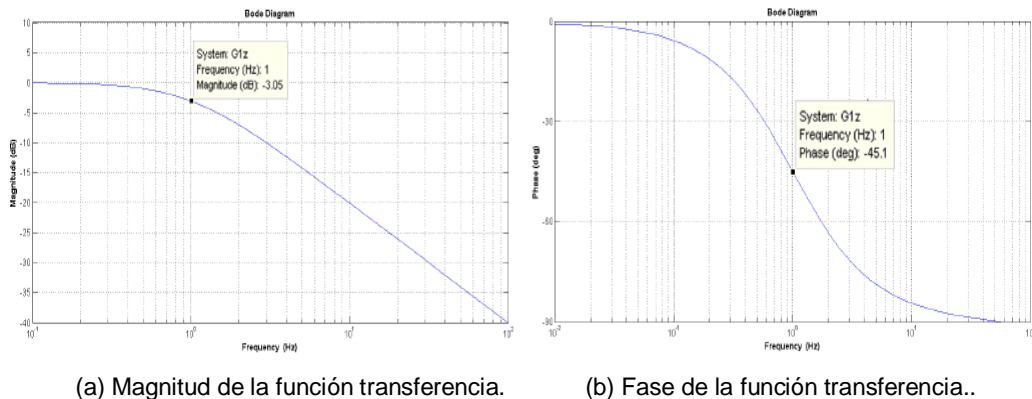


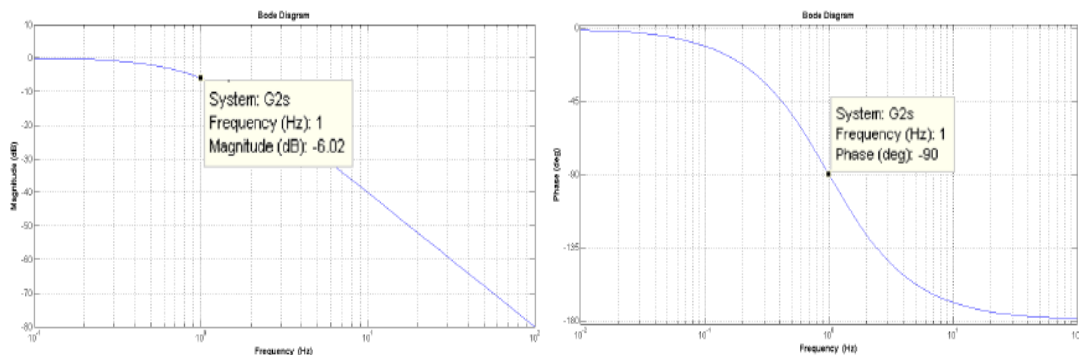
Figura 5 Bode del filtro de primer orden en tiempo discreto con frecuencia de corte f=1hz.

La misma prueba se puede realizar para el filtro de segundo orden, sabiendo que se tienen dos frecuencias naturales en el sistema, si se ajustan ambas al mismo valor, con la misma frecuencia de corte  $f=1\text{Hz}$  y periodo de muestreo  $T=0.001\text{s}$ , la función transferencia queda como se muestra en la ecuación 14 y función transferencia pulso queda expresada en la ecuación 15.

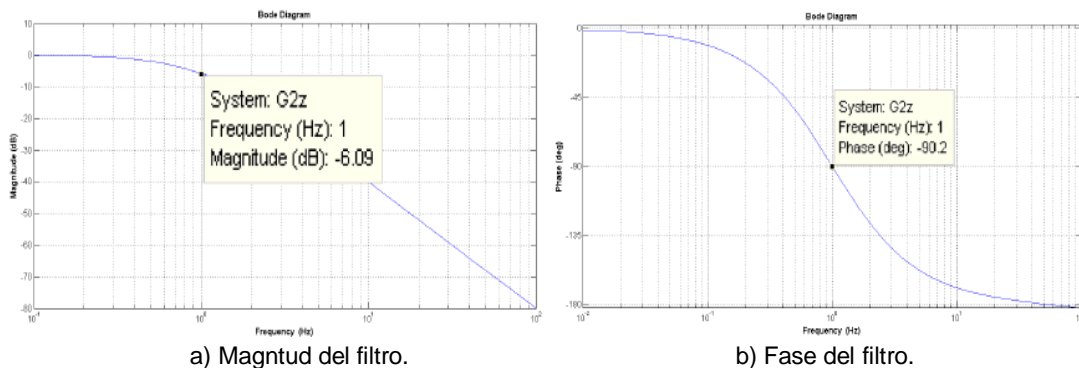
$$G2(s) = \frac{1}{0.02533s^2 + 0.3103s + 1} \quad (14)$$

$$G2(z) = \frac{3.945 \times 10^{-7} z^{-2}}{1 - 1.999z^{-1} + 0.9987z^{-2}} \quad (15)$$

En la frecuencia de corte ahora se tendrán  $-6\text{dB}$  (figura 6a), y una fase de  $-90^\circ$  (ver figura 6b), y ya que ambas frecuencias naturales, y por consiguiente ambos polos del sistema, cuentan con el mismo valor, se presenta una pendiente de atenuación de  $-40\text{dB/dec}$ . Así también en el modelo de tiempo discreto se presenta la magnitud mostrada en el modelo de tiempo continuo (figura 7a), la misma fase (figura 7b) y la misma pendiente de atenuación.



a) Magnitud del filtro en tiempo continuo. b) Fase) del filtro en tiempo continuo  
 Figura 6 Bode del filtro de segundo orden en tiempo continuo.



a) Magntud del filtro. b) Fase del filtro.  
 Figura 7 Bode del filtro de segundo orden en tiempo discreto función transferencia pulso.

## Implementación

La implementación se realizará mediante un microcontrolador en c++, en este caso se trata de un Arduino Due (pudiendo ser cualquier otro) y una interfaz gráfica desarrollada en LabView para crear gráficas de los datos provenientes de la tarjeta Arduino, con la finalidad de mostrar que el filtro diseñado es igual o más efectivo que algunas técnicas utilizadas para filtrar señales, como puede ser un promedio o un valor medio de datos, la única “desventaja” podría ser la carga matemática que conlleva por parte del diseñador, en especial si se quiere diseñar desde cero algún filtrado de este tipo, pero con distintas características. La señal que se procesará proviene de un cooler adaptado para funcionar de manera opuesta, es decir, genera un voltaje a partir del movimiento de sus aspas a manera de un sensor de flujo. Se realiza un acoplamiento entre el sensor descrito anteriormente y un cooler sin alterar, de esta manera se asegura que el mismo flujo circule a través de ambos.

El movimiento generado por las aspas del sensor produce una diferencia de potencial en las terminales que normalmente se utilizarían para alimentar el cooler, esta señal puede ser primeramente filtrada analógicamente para reducir el nivel de ruido que pudiera tener, pero en este caso se conectará directamente al convertidor analógico-digital con el que cuenta la tarjeta Arduino, con lo que se observa una señal que se encuentra oscilando constantemente y sin periodicidad; tiene una gran amplitud (tomando en cuenta los niveles mínimos y máximos de la señal comparando con los máximos y mínimos del convertidor) oscila a una frecuencia muy baja, del orden de unos cuantos Hertz (figura 8).

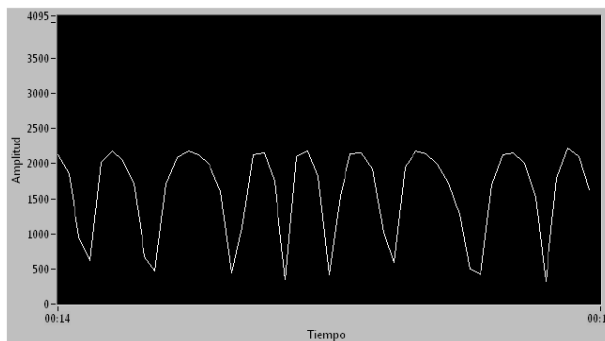


Figura 8 Señal sin filtrar.

Posteriormente la señal es procesada con el filtrado de primer orden, en esta ocasión se ajustó a una frecuencia de corte de 0.1Hz para poder reducir la mayor cantidad de componentes en frecuencia existentes en la señal. Dentro del programa de Arduino se creó una función que como parámetro recibe el valor de la señal y devuelve el valor de la salida del filtro, en este caso el valor calculado para el nodo de salida con los valores existentes en las variables, y siguiendo el algoritmo mencionado anteriormente, realizando los debidos corrimientos entre el nodo In y el nodo U1.

Con esto se consigue una señal más estable pero en la cual aún sigue existiendo una oscilación (figura 9), a partir de este punto es posible utilizar un promediado, o cualquier otra técnica, pero para este caso se implementaron las ecuaciones del filtro de segundo orden en vez de las de primer orden, aunque también se puede ingresar la salida obtenida en el proceso anterior a otro filtro de primer orden.

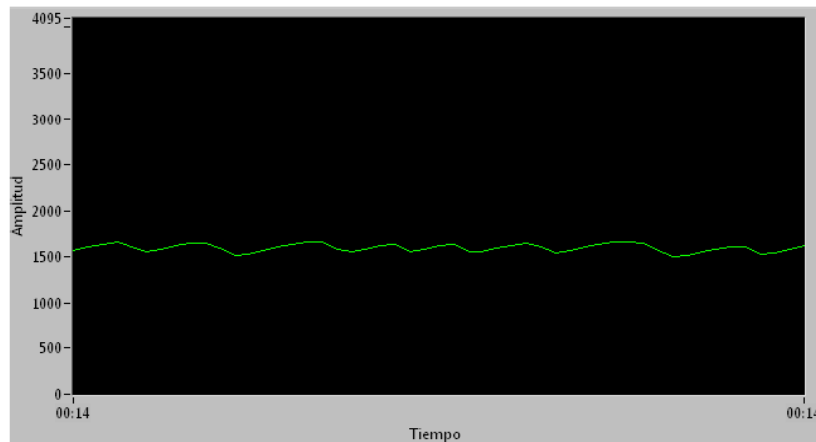


Figura 9 Señal procesada con filtro de primer orden y una frecuencia de corte  $f=0.1\text{hz}$ .

Para utilizar el filtro de segundo orden la estrategia es la misma, con la única diferencia de que se realizan los corrimientos al final de los cálculos, es decir, el valor de In pasa a u1 mientras que el valor de U1 pasa a U2.

Con este segundo sistema se consigue una señal mucho más estable ya que el nivel de oscilación es mínimo comparado con el filtrado de primer orden (figura 10), mucho más si se compara con la señal original, a pesar de que la frecuencia de corte utilizada es la misma que en el caso anterior, la diferencia radica en el

orden del filtrado, ya que un filtro de segundo orden presenta una pendiente de atenuación de -40dB/dec, mientras que uno de primer orden presenta una pendiente de -20dB/dec, es decir la pendiente del filtro de segundo orden es mas pronunciada que la de primer orden (figura 11), esto hace que las frecuencias superiores a la frecuencia de corte se vean más atenuadas.

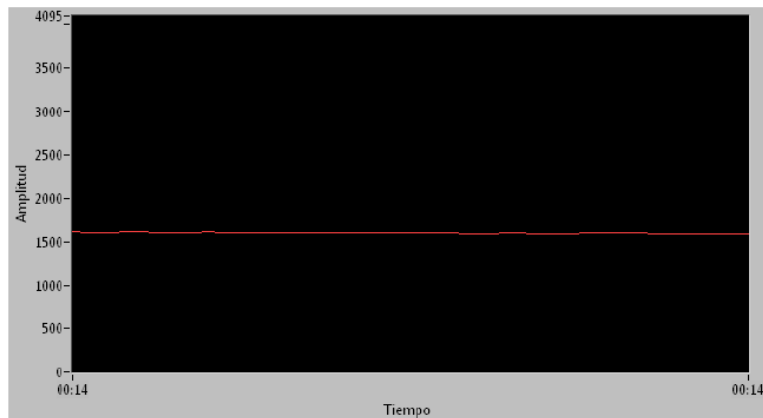


Figura 10 Señal procesada con filtro de segundo orden y una frecuencia de corte  $f=0.1$ hz.

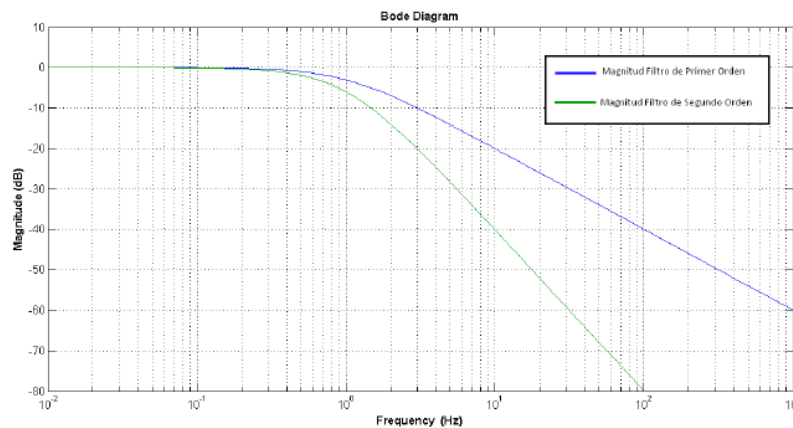


Figura 11 Pendientes de atenuación del filtro de primer orden y el filtro de segundo orden.

#### 4. Discusión

Los dos filtros diseñados son de bastante utilidad pero presentan un inconveniente, en cuanto a código se refiere, ya que habría que declarar una función por cada señal a filtrar, o hacer un arreglo matricial e ir indexando los filtros. Con la finalidad de resolver dicha problemática se planteó programar la clase LPFilter, la cual contiene los métodos correspondientes a los filtros de

primero y segundo orden, de esta manera se puede utilizar un mismo código para filtrar  $n$  señales, simplemente declarando cada filtro con su respectiva frecuencia de corte y periodo de muestreo, posteriormente utilizando el método deseado (primer o segundo orden).

## 5. Conclusiones

Primeramente cabe señalarse que el procedimiento descrito en este artículo permite quitar carga matemática a la computadora ya que es el diseñador quien lleva a cabo el cálculo de las ecuaciones que son utilizadas, de manera que el programa solo tiene dos ecuaciones para resolver. Las dos ecuaciones proporcionadas al sistema están en función de la frecuencia de corte y el periodo de muestreo, por lo que es de fácil reconfiguración para ajustar una amplia gama de valores para las frecuencias de corte y el periodo de muestreo sin necesidad de que la computadora tenga que volver a determinar ecuaciones, sino coeficientes de las ecuaciones que a su vez solo se determinan con una función de exponenciación. Esto se vuelve de utilidad para procesar señales con oscilaciones que no son periódicas, ya que sería complicado determinar su frecuencia base y se tendrían que probar distintas frecuencias de corte.

## 6. Referencias

- [1] J. Antonio, Á. Cedillo, K. Michael, L. Bos, G. M. Romero, "Implementación de Filtros Digitales tipo FIR en FPGA". No.37. 2008. Pp.83-87.
- [2] M. Mirghani, Implementation of Matched Filters Using Microcontrollers. 2016. Pp. 128–132.
- [3] G. J. Dolecek, S. K. Mitra, "Computationally Efficient Multiplier-Free Fir Filter Design". Vol. 10. No. 3. 2007. Pp. 251–267.
- [4] A. H.-C. B. Psenicka, F. García-Ugalde, "The Bilinear Z Transform by Pascal Matrix and Its Application in the Design of Digital Filters". Vol. 9. No. 11. 2002. Pp. 368–370.
- [5] B. C. Kuo, Sistemas de control automático. 7 ed. 1996.



## **7. Autores**

Ing. Armando Satiel Chipule Pérez obtuvo la licenciatura en Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Orizaba, actualmente es estudiante de la Maestría en Ingeniería Electrónica del mismo instituto, sus líneas de investigación son Teoría de Control Clásico y Programación de Microcontroladores.

Dr. Gerardo Águila Rodríguez, obtuvo el grado de Doctor en ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la SEES, CINVESTAV – I.P.N. en el año 2008.

Dr. Rubén Posada Gómez es Dr. En Automatización y procesamiento de señales del Institut National Polytechnique de Lorraine.

# DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA SELECCIÓN DE GRANOS DE CAFÉ TOSTADO BASADO EN UN MICROPROCESADOR RASPBERRY-PI

***Alberto Nicolas Bautista Bautista***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*alberto\_bautista85@hotmail.com*

***Víctor Vivanco Trujillo***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*vivanco.truvi@gmail.com*

***Mario Alberto García Martínez***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*gmmario55@gmail.com*

***Oscar Osvaldo Sandoval González***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*o.sandovalgonzalez@gmail.com*

## **Resumen**

En el presente trabajo se presenta el diseño de un sistema basado en el procesamiento de imágenes digitales para la selección de granos de café tostado, mediante la utilización de software y hardware libre. Se realiza la implementación de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) basada en un microprocesador Raspberry-Pi "B" Modelo 2. Las características intrínsecas del microprocesador, con el apoyo de una cámara dedicada (Raspicam) y la programación del software requerido, han permitido obtener y procesar imágenes en formato digital. El procesamiento de las imágenes se basa en utilizar el método *background subtraction*. Posteriormente se calcula la ROI (*Region of interest*) del área de interés y se genera el histograma de color de cada ROI. Este histograma se compara con un histograma base y se obtiene un valor que permite seleccionar

granos de café tostado. Con esta plataforma software/hardware se puede realizar una selección correcta de granos de café tostado de acuerdo a la característica particular de color que requiere la verificación de la calidad del tipo de grano de café que se desee por parte del usuario.

**Palabra(s) Clave(s):** Procesamiento de imágenes, Raspberry Pi, tarjetas de adquisición de dato (DAQ).

## 1. Introducción

El procesamiento digital de señales, y particularmente de imágenes, es ya en nuestro tiempo un área de aplicación tecnológica altamente atendida y necesaria. La selección de productos deseados entre un conjunto de productos que puede incluir defectuosos o no deseados en una línea de producción, es llevada a cabo comúnmente de forma manual; este procedimiento manual puede presentar diferentes problemáticas y factores que repercuten en la eficiencia del sistema. A lo largo de los últimos años y con el fin de realizar sistemas verdaderamente capaces de modernizar, agilizar y volver más eficiente esta parte del proceso, se ha optado por utilizar técnicas que basen su funcionamiento en el campo de la visión artificial y el procesamiento de imágenes. Se han desarrollado varios sistemas de selección de diversos materiales o productos bajo éste principio de funcionamiento. Un ejemplo de ello es el sistema de visión para la selección de tamarindo dulce reportado en [1], el cual permite identificar entre dos tipos de vaina de tamarindo en base a los parámetros de forma, tamaño y defectos. Este sistema se encuentra compuesto por una cámara CCD, microcontroladores, sensores y una computadora; el programa de computadora se encuentra escrito en Borland C++5.0. Un ejemplo más es el desarrollo de una máquina para la automatización de la selección de arilos de granada basada en visión por computadora. Los autores en [2] muestran que esta máquina es capaz de detectar y remover material indeseado y seleccionar los arilos por cuatro colores. Este sistema de visión por computadora se encuentra compuesto por dos cámaras, una computadora y un sistema de iluminación; el software para el análisis de las imágenes se encuentra escrito en lenguaje C. Un ejemplo final de la utilización de

estos sistemas es el trabajo realizado en [3], para determinar la aplicabilidad y efectos de un sistema de selección por color en la línea de producción de bulgur. Para el desarrollo del sistema se utilizó un microprocesador, un fotodetector, dos cámaras y una computadora.

Así como en el caso del tamarindo, la granada y otros productos de diversas áreas de producción se han automatizado sus procesos de selección y análisis, en este trabajo se busca desarrollar un sistema de selección de granos de café tostado basado en el microprocesador Raspberry Pi. Este trabajo se enfoca en la necesidad de controlar un proceso de selección de granos de café tostado en base al procesamiento de imágenes con ayuda de tarjetas DAQ (tarjetas de adquisición de datos) que se consideran de uso libre sobre plataformas software/hardware. Cabe mencionar que la adquisición de datos consiste en la medición de un fenómeno físico o eléctrico para generar información que pueda ser manipulada por un sistema electrónico, proporcionando una solución para la obtención de mediciones que sea más potente, flexible y rentable [4].

En éste proyecto se ha diseñado y desarrollado un sistema de adquisición de datos basado en el microprocesador Raspberry-Pi B modelo 2. La tarjeta Raspberry-Pi permite el procesamiento de información sin la necesidad de comunicarse o conectarse con una computadora personal, lo cual hace posible crear un sistema de adquisición de datos mínimo dedicado a las tareas específicas de recepción, transmisión y tratado de la información [5].

La interfaz de este sistema está creada sobre las plataformas de programación Gambas y Python, las cuales son plataformas de software de desarrollo libre; por lo tanto, puede ser reprogramadas a nivel software cuantas veces sea necesario. Esto permite la implementación de un sistema versátil, multipropósito y aplicable a diversos sistemas que requieren el procesamiento de señales digitales.

## **2. Desarrollo**

El sistema de adquisición de datos que proponemos está integrado por un sensor, una tarjeta DAQ y el microprocesador que contiene un software de

programación que permite crear una interfaz y procesar la información recibida como se muestra en la figura 1.

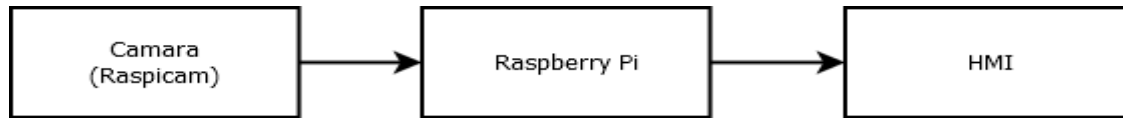


Figura 1 Diagrama a bloques de componentes del sistema.

Las señales analógicas y digitales pueden describir un sinnúmero de fenómenos y por medio de diversos dispositivos pueden ser captadas e interpretadas para su posterior utilización. Este trabajo se enfoca principalmente en el tratado de señales digitales. Una señal digital a diferencia de una señal analógica se define sobre un intervalo discreto de tiempo [6]. El sistema recibe señales digitales, las cuales provienen de un sensor, en este caso una cámara. El dispositivo que actúa como sensor es la cámara Raspicam, dispositivo propio de la tarjeta Raspberry-Pi. Es una cámara de video de alta definición con una resolución de 5 megapíxeles, grabación de video en 1080p HD y con una frecuencia máxima de cuadros de 90 fps [7]; Esta última característica hace que este dispositivo sea idóneo para la realización de éste proyecto.

Para éste trabajo se tomó como caso de estudio la selección de granos de café tostado [8], usando como plataforma de hardware un microprocesador Raspberry-Pi.

El sistema de selección de granos de café tostado se compone de una tolva dosificadora, una banda transportadora, una fuente de luz dentro de un medio controlado de forma de prisma rectangular de 20x15x10cm, una cámara (Raspicam), una electroválvula y la unidad de control y procesamiento de imágenes. En la figura 2 se puede observar un esquema del sistema de selección de granos de café tostado.

Para iniciar el proceso de análisis y selección de granos de café tostado; dentro de la tolva se introducen algunos granos de café, estos caen de la tolva hacia una banda transportadora y se desplazan hacia el medio controlado, el cual se

encuentra iluminado en su interior por unas tiras de *Leds* localizadas en la parte superior y lateral de éste.

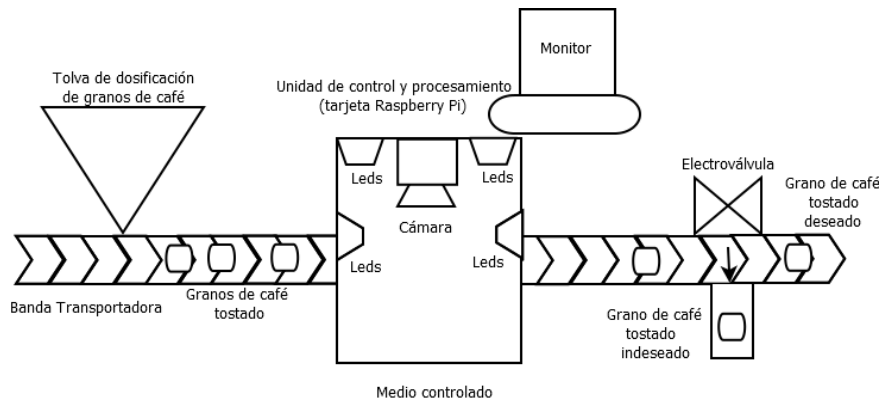


Figura 2 Diagrama del sistema de selección de granos de café tostado.

Una vez que los granos de café se encuentran dentro del medio controlado son captados por la cámara, la cámara manda la información hacia la tarjeta Raspberry Pi, aquí la información es procesada y mostrada en pantalla. El resultado obtenido por medio del procesamiento de imágenes de los granos de café es transmitido a la electroválvula, la cual permite el paso del grano de café tostado o lo expulsa hacia otro canal, dependiendo si el grano de café es deseado o no de acuerdo al parámetro de color establecido por el usuario.

El proceso utilizado para el tratamiento de las imágenes se lleva a cabo de la siguiente manera:

- Como primer paso se le proporciona al programa una imagen base, la cual sirve como muestra para establecer el color del grano de café tostado contra el cual se compararán los demás granos de café y así seleccionar los que son correctos o no, esto se puede observar en la figura 3.

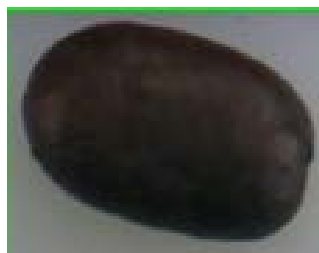


Figura 3 Imagen de grano de café tostado base.

- Posteriormente se activa la toma de imagen y se realiza el método denominado *background subtraction*, el cual consiste en determinar un frame inicial para poder compararlo con los siguientes frames que se van generando a lo largo de la captación de video. Este frame inicial se toma de la primera imagen que ve la cámara al correr el programa, se guarda la imagen generándose una matriz de ésta y posteriormente se van tomando frames consecutivos a lo largo de la toma del video, estos frames también se guardan en forma de una matriz. Cada matriz que se genera de cada frame posterior al inicial es restada a la matriz del frame inicial, esto permite detectar cambios que se generen en el área donde se está trabajando, dicho con otras palabras, se detecta cualquier movimiento generado en el área de interés. Cada vez que es detectado algún tipo de cambio con respecto al frame inicial, éste es mostrado por medio de una máscara llamada *FrameDelta*. En esta máscara se muestra claramente el resultado de cada resta entre el frame inicial y los frames posteriores. Una vez que es detectado algún movimiento, éste es detectado por la máscara *FrameDelta*, y se determina el área donde se localiza el movimiento, como se observa en la figura 4, y posteriormente será enmarcado por un rectángulo verde.



Figura 4 Máscara *FrameDelta* original y máscara *FrameDelta* con grano de café tostado.

- Este procedimiento está basado en el método de la región de interés o ROI por sus siglas en inglés (*region of interest*), el cual consiste en tomar solo una porción del total de una imagen y así poder analizar más fácilmente esa región específica. Dibujar una región de interés es uno de los puntos críticos de esta metodología para detección de granos de café. La ROI

genera una pequeña imagen del objeto presente en ese momento en que se produce un cambio en el frame inicial, para este caso se trata de granos de café tostado, captando principalmente la parte central del grano.

- Una vez generada la ROI, ésta es captada como una pequeña imagen y a cada imagen generada de una ROI se le genera su propio histograma de color; la ROI se puede observar en la figura 5. Al principio del programa se cargó una imagen base de un grano de café tostado, la cual sirve como referencia para identificar los granos de café correctos; a esta imagen base se le calcula su histograma de color también. Una vez calculado el histograma de color de la imagen base y de cada grano de café tostado detectado por la cámara, se comparan ambos histogramas y si tienen gran coincidencia se determina que es un grano de café correcto. El programa utiliza un método de comparación basado en una librería *OpenCV*. Este método se basa en encontrar la correlación (*CV\_COMP\_CORREL*) entre histogramas; cuando existe una correlación perfecta entre el histograma base y el histograma generado de cada ROI. El valor que nos proporciona la comparación de correlación es 1.0, lo que significa que las dos imágenes son exactamente iguales y dependiendo de qué tan diferentes sean las imágenes, los valores que nos proporcione la comparación de histogramas tendrá un valor entre 0.9 y 0; el valor "0" significa que son completamente diferentes.



Figura 5 ROI de un grano de café tostado.

- Después de realizar varias pruebas con el algoritmo de detección de granos de café tostado se observaron los valores que proporcionaba la comparación



de histogramas y se determinó que para el algoritmo de programación se tomarán valores entre un rango de 0.5 y 1.0 para determinar si un grano de café tostado es correcto. Si la comparación de histogramas da un valor menor de 0.5 significa que no corresponde a un grano de café tostado correcto, esto debido a que no es del color deseado o idóneo.

- Una vez que son comparados los granos de café y se determina si son correctos o no de acuerdo al valor proporcionado por el programa, se envía un valor “1” o “0” por uno de los puertos GPIO de la tarjeta Raspberry Pi. El valor “1” corresponde a un voltaje de 3.3 V y el valor “0” a un voltaje de 0 V. Estos voltajes son mandados a una electroválvula FESTO, la cual al recibir la señal de control de valor “1” se acciona y permite el paso del aire a presión; la electroválvula está alimentada con una presión de 30 psi de aire. La electroválvula al permitir el paso de aire al recibir un valor de “1” proveniente de la tarjeta Raspberry Pi realiza la acción de expulsar hacia un canal externo los granos de café tostado incorrectos o no deseados para el sistema. Si el grano de café es semejante al color propuesto, el programa manda un valor “0” desde la Raspberry Pi hacia la electroválvula, lo cual significa que no realizará ninguna acción la electroválvula, permitiendo el paso del grano de café tostado por la banda sin ningún problema. En la figura 6 se muestra el sistema de selección de granos de café tostado.

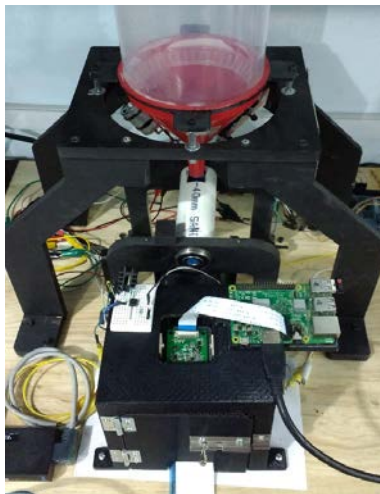


Figura 6 Sistema de selección de granos de café tostado.

### 3. Resultados

Después de realizar varias pruebas con el sistema de selección de granos de café tostado se obtuvieron los siguientes resultados. Se trabajó con la cámara Raspicam para realizar la selección de granos de café, teniendo como objetivo identificar granos de un color específico. Se lograron detectar y seleccionar satisfactoriamente los granos de café tostado de determinado color; se colocó un vidrio cuadrado en la banda transportadora en el área que se encuentra dentro del medio controlado, ya que éste logra resaltar mejor los granos de café u objetos que pasen sobre él. En la figura 7 se puede ver el arreglo que se hizo en la banda transportadora.



Figura 7 Vidrio que ayuda a reconocer mejor los granos de café y objetos en movimiento.

Una vez que se encuentran los granos de café sobre la superficie de vidrio; para el programa es más fácil detectarlos sobre esa superficie. El programa calcula el histograma de color de cada objeto y lo compara con el histograma base, un valor entre 0.5 y 1 resultante de la comparación, significa que es un grano de café tostado correcto, por lo tanto, se redondea el valor a 1 para poder ser mandado por un puerto GPIO de la tarjeta Raspberry Pi. Al realizar pruebas con diferentes colores y objetos se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1 Resultado de comparación de histogramas de color.

Color y objeto	Resultado de comparación de histogramas	Valor pin GPIO
 Grano de café tostado	0.744577721058	1
 Objeto semejante a grano de café	0.489854360464	0

Tabla 2 Continuación de resultado de comparación de histogramas de color.


Color y objeto	Resultado de comparación de histogramas	Valor pin GPIO
 Objeto semejante a grano de café	0.452702584625	0
 Grano de café quemado	0.331545286125	0
 Objeto semejante a grano de café	0.319300271048	0

Tabla 3 Continuación de resultado de comparación de histogramas de color.

Color y objeto	Resultado de comparación de histogramas	Valor pin GPIO
 Objeto semejante a grano de café	0.0650878812936	0
 Objeto semejante a grano de café	0.057513889765	0

#### 4. Discusión

Un primer punto que debemos mencionar es la situación que se detectó en cuanto a la velocidad de frames por segundo al momento de detectar los granos de café; ésta se veía ralentizada considerablemente al correr el programa y mostrar la información en pantalla, situación un poco problemática si se requiere gran exactitud al realizar el procesamiento de imágenes. La instalación de librerías externas al sistema operativo Raspbian, la librería OpenCV y al IDE de Python es algo destacable por mencionar, ya que si no se cuenta con suficiente espacio en memoria podría causar problemas a nivel hardware.

#### 5. Conclusiones

Se ha presentado el diseño de un sistema de procesamiento de imágenes aplicado a la selección de granos de café tostado. El sistema está basado en el uso de un microprocesador Raspberry-Pi como procesador de uso específico en contraparte de la mayoría de los sistemas de este tipo que requieren de un procesador de uso general, es decir de una computadora. Consideramos que el procesamiento de imágenes fue bastante eficiente y consistente al permitir realizar correctamente el análisis de las imágenes procedentes de la cámara Raspicam,

procesando la información y mostrándola en pantalla para el análisis por parte del usuario.

El procesamiento de imágenes se puede analizar más profundamente en trabajos futuros atendiendo a la detección y selección de los granos de café por medio de la implementación de histogramas de color mostrándolos en pantalla o guardándolos en un registro de imágenes y así poder ver el porcentaje de color de la muestra que se está tomando y observar más claramente cómo es que se obtienen los resultados de cada comparación; buscando principalmente no ralentizar el sistema.

Un trabajo futuro consiste en mejorar la recepción de los datos obtenidos por medio de la comunicación serial entre tarjetas y sensores, para poder realizarla de manera más rápida y precisa.

En cuanto al procesamiento de las imágenes, se procurará desarrollar un trabajo más preciso en el desarrollo del algoritmo de detección de granos de café para prevenir la ralentización del programa y poder realizar en mayor número de frames el análisis y procesamiento de las imágenes procedentes de la Raspicam.

Poder grabar en 60 fps y 90 fps la toma de video y guardar en un registro los videos, y así analizar con mayor detalle la información procedente de la cámara, será un trabajo relevante para un futuro mediato.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] B. Jarimopas, N. Jaisin, "An experimental machine vision system for sorting sweet tamarind". *Journal of food engineering*. 15 May 2008. Pág. 7.
- [2] J. Blasco, S. Cubero, J. Gómez – Sanchís, P. Mira, E. Moltó. "Development of a machine for the automatic sorting of pomegranate (*Punica granatum*) arils base don computer vision". *Journal of food engineering*. 30 May 2008. Pág. 8.
- [3] M. Bayram, M. D. Öner. "Determination of applicability and effects of color sorting system in bulgur production line". *Journal of food engineering*. 7 March 2005. Pág. 8.
- [4] <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. Junio 2016.

- [5] M. Richardson, S. Wallace, "Getting started with Raspberry Pi", Published by O'Reilly Media, Inc. December 2012
- [6] OGATA, Katsuhiko. "Sistemas de Control en Tiempo Discreto". Segunda Edición. 1996. Prentice Hall. México D.F. Pp. 1-6.
- [7] Módulo de Cámara. <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/camera/>. Junio 2016.
- [8] G. Daza, L.G. Sánchez, J.F. Suárez, "Selección de características orientadas a sistemas de reconocimiento de granos maduros de café". *Scientia et Technica*. Vol. 13. Issue 35. 2007. Pp. 139-144.
- [9] J. E. Hernández, F. Prieto, "Clasificación de granos de café usando FPGA". *Ingeniería y Competitividad*. Vol.7. Issue 2. 2005. Pp. 35-42.

## **7. Autores**

Ing. Alberto Nicolás Bautista Bautista es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba y cursa actualmente estudios de Maestría en Ingeniería Electrónica en la División de Posgrado del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Ing. Víctor Vivanco Trujillo es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba y cursa actualmente estudios de Maestría en Ingeniería Electrónica en la División de Posgrado del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Dr. Mario Alberto García Martínez obtuvo su grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV del IPN y actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Maestría en Ing. Electrónica.

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González obtuvo su grado de Doctor en Robótica en la Scuola Superiore Sant'Ana en Pisa Italia, y actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Maestría en Ing. Electrónica.

# ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE ROEDOR USANDO PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

***Jorge Manuel Santa Bárbara Cebada***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*jomasabace@gmail.com*

***Aldrin Barreto Flores***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*aldrin.barreto@correo.buap.mx*

***María Isabel Martínez García***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*martinez.garcia.isa@gmail.com*

## **Resumen**

Este trabajo propone un algoritmo usando procesamiento de imágenes en Matlab para hacer el análisis del comportamiento de un roedor dentro de una prueba específica de evaluación del aprendizaje y la memoria. La prueba analizada es de reconocimiento de objetos, en la cual se le presentan al ratón un par de objetos diferentes para que los explore, midiendo el tiempo de exploración en cada uno de los objetos para conseguir una valoración de la memoria del roedor. El algoritmo propuesto obtiene la información de la prueba mediante un video, el cual analiza fotograma por fotograma para conocer la ubicación aproximada del roedor, donde nos permite conocer el comportamiento del animal a partir de su área y de su centroide, además de que es posible medir con mayor precisión los tiempos que tarda explorando cada uno de los objetos y la frecuencia con la que se encuentra en determinadas zonas de la caja de exploración.

**Palabra(s) Clave(s):** Algoritmo, análisis de comportamiento, procesamiento digital de imágenes, seguimiento automático.

## 1. Introducción

Existen varias pruebas de conducta para la evaluación de trastornos cognitivos en modelos animales, las cuales cada una tiene ciertas características específicas de acuerdo a lo que se desea investigar. La prueba de reconocimiento de objetos es una poderosa herramienta experimental para valorar los efectos de los fármacos sobre la memoria y los mecanismos neurobiológicos relacionados con el aprendizaje y la memoria. Para este tipo de pruebas, se requiere que el investigador preste su completa atención al momento de realizar el experimento, con la finalidad de no perder los detalles del comportamiento del roedor, debido a que se mide el tiempo de exploración que tiene el ratón en cada uno de los objetos, además de la ubicación y el comportamiento que tiene el roedor.

La implementación de visión por computadora y un algoritmo adecuado para procesar el comportamiento del animal resulta una manera de facilitar el análisis de la prueba, debido a que se puede llevar un mejor control de las variables importantes del experimento, como son los tiempos de exploración entre los objetos y la trayectoria que sigue el ratón a lo largo de la prueba. El programa pretende que el investigador tenga la facilidad de comparar lo observado con los resultados arrojados por el algoritmo, para lograr un trabajo más eficiente.

Existen varios trabajos se han ocupado sistemas de visión para poder analizar el comportamiento de animales en diferentes pruebas debido a que es un método no invasivo durante el monitoreo. En el artículo con título *an experimental setup for measuring distance and duration of rat behavior* proponen un método simple para medir el comportamiento de los roedores en dos modelos de experimentos diferentes, donde utilizan una cámara web para y un programa basado en 2 procesos principales: agrupamiento por K-mean para reconstruir el fondo y para la extracción del animal. Este programa fue comparado con identificación manual por parte de expertos, obteniendo resultados por debajo de casi un centímetro de diferencia, considerando únicamente ratones albinos para generar más contraste con respecto al fondo, teniendo la finalidad de obtener un ambiente de la prueba más controlado [1]. Existen otros trabajos en los cuales las condiciones no son controladas, por ejemplo, en el artículo *Catching a rat by its edglets* proponen un



método sin modificar las condiciones de su entorno dentro del laboratorio, destacando que su entorno cuenta con aserrín y el bebedero, complicando el análisis debido a que el roedor puede enterrarse o confundirse con el aserrín, por lo cual la cámara es colocada de una manera lateral. Este trabajo propone un nuevo método de segmentación para extraer los bordes del objeto y pulsos basados en pedazos discontinuos de los bordes, teniendo resultados consistentes para diferentes fondos y diferentes dimensiones de ratas [2]. Existen varios tipos de estudio con roedores, por lo que las variables que se desean analizar pueden variar, por ejemplo, la prueba de nado forzado (FST por sus siglas en inglés) requiere conocer todos los movimientos realizados por el roedor, los cuales realiza con una gran velocidad, por lo que se requiere analizar más fotogramas por segundo para no perder detalle del comportamiento del roedor. Se ha dado solución a esta problemática con sistemas de visión de alta velocidad (240 fotogramas por segundo), dándoles mayor precisión en movimientos de sus cuatro patas para detectar si intenta nadar o escalar por las paredes del recipiente. El roedor es segmentado y le aplican operaciones morfológicas para tener una mejor resolución en cada uno de los fotogramas, debido a que estos son comparados para analizar el movimiento del animal [3].

## **2. Desarrollo**

### **Prueba de reconocimiento de objetos**

La prueba de reconocimiento de objetos se fundamenta en la conducta espontánea del roedor para explorar objetos nuevos en lugar de explorar objetos con los que se encuentra familiarizado, la cual consiste en colocar al animal en una caja de exploración (caja de 60x55x30 de acrílico negro) y hacerlo explorar un par de objetos [4]. La primera etapa se conoce como habituación, donde se le permite al roedor que se familiarice con el entorno sin ningún objeto y tiene una duración que va de los 10 minutos a la media hora. Posteriormente se realiza el entrenamiento, donde se colocan dos objetos idénticos en distintas posiciones (objetos A) y se deja en el interior de la caja durante 5 minutos. Luego de esta fase, el ratón es retirado por un periodo de tiempo determinado por la prueba a

realizarse, con la finalidad de tener un tiempo de retención. En la siguiente fase se deja un objeto A (que será el objeto conocido) y se reemplaza el otro por un objeto nuevo (objeto B), midiendo también los tiempos de exploración que tiene en cada uno de los objetos. Después de un periodo de retención como en la fase anterior, se vuelve a introducir el ratón a la caja de exploración, pero esta vez el objeto B es reemplazado por un objeto nuevo (objeto C) manteniendo el objeto A, donde se sigue el mismo procedimiento [5]. En la figura 1 se observa el procedimiento seguido para realizar el experimento. Se espera que el ratón explore más los objetos nuevos a los que es sometido, que al objeto al cual está familiarizado. Las pruebas se realizan con objetos de diferentes características, como son la forma, el color, el tamaño, brillo, material y textura, considerando que el material debe ser muy fácil limpiarlo, lo cual es muy importante para que el olfato del roedor no interfiera en la prueba [6]. Por lo tanto, como las dimensiones de los objetos son similares y cuentan con un determinado color, se usarán cada una de estas características para realizar e implementar el algoritmo.

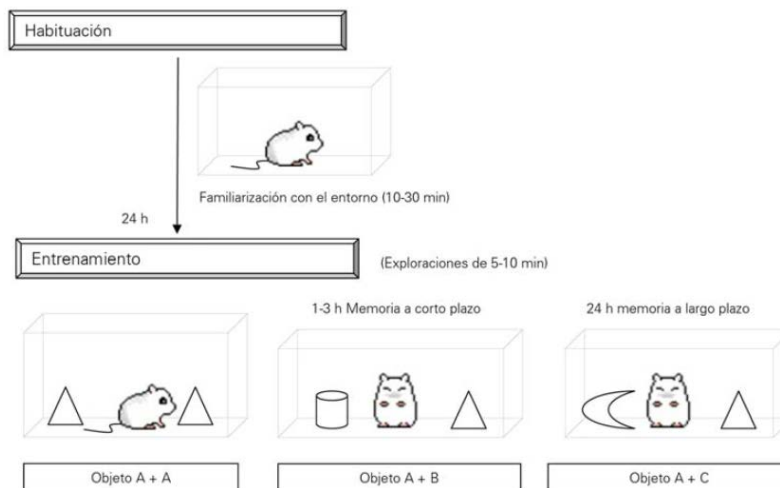


Figura 1 Prueba de reconocimiento de objetos.

### Obtención del video de la prueba

Las pruebas de reconocimiento de objetos fueron grabadas con una cámara Logitech C930e, la cual cuenta con características óptimas para el trabajo a realizar. Los videos cuentan con 15 fotogramas por segundo, con dimensiones de

1920x1080 en formato MP4. La cámara fue colocada en vista aérea a 65cm de distancia con respecto a la base de la caja de acrílico, teniendo visión de la base y de las paredes, debido a que el ratón puede llegar a pararse en las esquinas. La iluminación fue controlada mediante un dimmer, debido a que los ratones son fotofóbicos, así que se mantuvo una iluminación adecuada para no afectar la prueba y para obtener una mejor calidad de imagen.

Se generaron 28 videos de las pruebas realizadas con 3 ratones, los cuales tuvieron diferentes objetos a explorar. En la tabla 1 se muestran las características de los objetos para las pruebas de memoria a corto plazo. Obsérvese que la morfología y los colores varían demasiado en cada una de las fases de la prueba, por lo que los valores de segmentación deben reconocer esa diversidad de colores.

Tabla 1 Características de las pruebas para analizar memoria a corto plazo.

No. de ratón	Habituaación	Objetos A – A	Objetos A - B	Objetos A- C
1	10 min.	5 min. Saleros rojos	5 min. Salero rojo Pirinola amarilla	5 min. Salero rojo Garrafa verde
2	10 min.	5 min. Saleros azules	5 min. Salero azul Pirinola roja	5 min. Salero azul Dado amarillo
3	10 min.	5 min. Saleros rojos	5 min. Salero rojo Pirinola verde	5 min. Salero rojo Garrafa roja

### Procesamiento de la imagen

Las pruebas fueron realizadas con ratones albinos, por lo que contrastaban considerablemente con el fondo oscuro de la caja (construida de acrílico negro), además de que los objetos eran coloridos y de formas diversas. En este caso, a pesar de que la intensidad lumínica es controlada, no hay homogeneidad en la dispersión de la luz, por lo que se filtra ese ruido presente en la zona derecha de la base de la caja. Es muy importante eliminar dicho ruido debido a que puede alterar las coordenadas del objetivo. En la figura 2 se observa el contraste que se generan entre los objetos, el objetivo y el fondo, además del ruido que se ocasiona por la colocación de la iluminación.

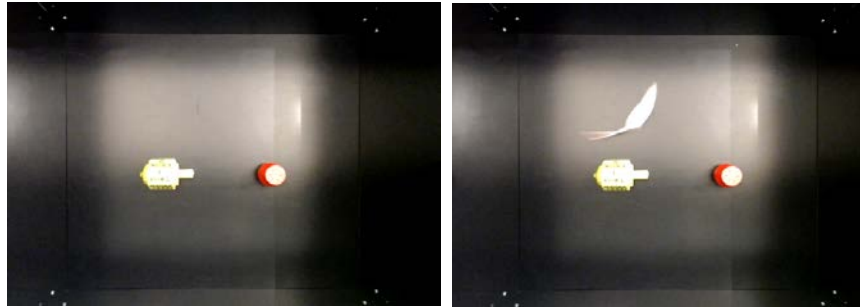


Figura 2 Caja de observación con 2 objetos diferentes.

El primer paso es segmentar el ratón, para lograr obtener únicamente un objeto, y que se le pueda tener un seguimiento correcto a lo largo de la prueba. Para esto se obtienen los objetos presentes en el entorno sin el ratón, lo cual nos permitirá discriminarlos a la hora de seguir la trayectoria del roedor, teniendo la ventaja de que los dos objetos presentes no se mueven de lugar durante toda la fase de la prueba. Por lo tanto, teniendo segmentados a los dos objetos en una imagen binaria, cada uno de los fotogramas a analizar serán transformados también a imágenes binarias para realizar una operación AND con la imagen de los objetos segmentados, teniendo como propósito que el único objeto presente sea el roedor. Es importante mencionar que el umbral colocado en ambas imágenes es prácticamente el mismo. La figura 3 muestra parte de los pasos seguidos para segmentar el ratón, donde nos da como resultado solo un objeto en la imagen. Para poder tener un seguimiento al objeto, se extraen las características propias como son el centroide y el cuadro delimitador del objeto, lo que nos permite conocer las coordenadas en las que se encuentra el ratón en cada uno de los fotogramas, con la finalidad de ver la cercanía que tiene con cada uno de los objetos [7].

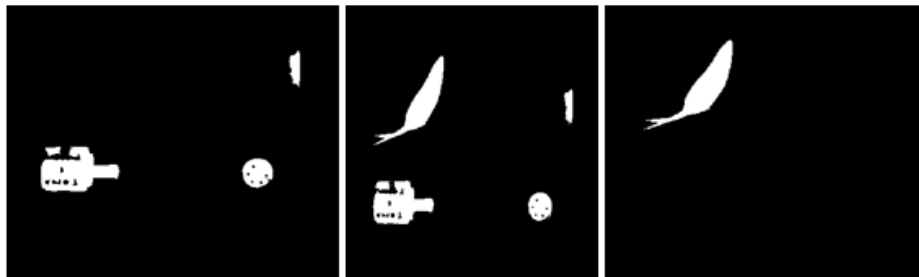


Figura 3 Segmentación del ratón.

Las principales variables a medir son los tiempos de exploración en cada uno de los objetos, por lo que se necesita conocer las coordenadas de los objetos presentes. Usamos la imagen donde solo se encuentran el par de objetos para segmentarlos, pero como queremos una mejor precisión de la ubicación del objeto, se hacen operaciones morfológicas para asegurar la existencia de solo dos objetos dentro de la imagen binaria. La primera operación es la erosión, lo que permite que el ruido sea eliminado como es el caso de la luz y de los tornillos de la caja, lo que ocasionará que se mantengan la forma de los dos objetos deseados y que se pierda parte de su geometría, por lo tanto, se emplea la dilatación para intentar recuperar sus dimensiones originales. Por la forma variada que pueden llegar a tener los objetos, se pueden generar hoyos dentro del área del objeto al segmentarlo, provocando que el algoritmo detecte más objetos en lugar de detectar solo uno, por lo tanto, es importante llenar estos hoyos para detectar el objeto de manera adecuada. En la figura 4 se muestra el cuadro delimitador que mantiene en cada fotograma, tanto del objeto amarillo, como el del objeto rojo, por consiguiente, como ya conocemos la ubicación del animal y ahora ya conocemos la ubicación de los dos objetos, podemos obtener el tiempo que tarda el ratón en explorar cada uno de los objetos. Para que esto sea posible, nos basamos en el área de los objetos y en el área del objetivo para tener un área considerada como zona de exploración, la cual, teniéndola como condición, nos permitirá saber si el ratón interactúa con el objeto o no, siempre y cuando su centroide se encuentre en esta área.

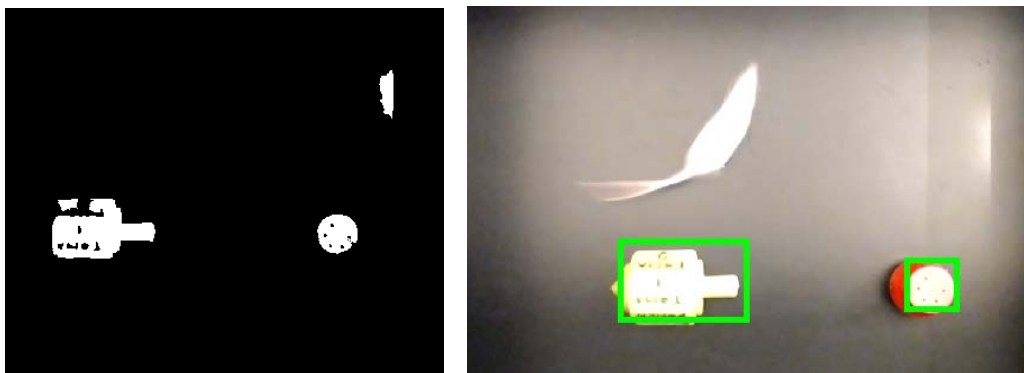


Figura 4 Detección de la ubicación de los dos objetos.

El código analiza 7 fotogramas por segundo, por lo tanto, por cada fotograma que detecte que el roedor se encuentra ubicado en una zona cerca de un objeto se sumaran 143 ms a una variable, para que, al término de la prueba, se conozca el tiempo total que invirtió en explorar cada uno de los objetos.

### **Pseudocódigo**

A continuación se describe brevemente el pseudocódigo del algoritmo realizado para el análisis del comportamiento del roedor:

- Grabar prueba.
- Extraer fotogramas del fondo sin roedor.
- Extraer fotogramas del video.
- Transformación de fotogramas a imágenes binarias.
- Segmentar el par de objetos.
- Obtener las características de los objetos (coordenadas, área, centroide).
- Segmentación del ratón en cada uno de los fotogramas.
- Operación lógica AND de la imagen de objetos segmentados y la imagen de roedor segmentado.
- Aplicación de operaciones morfológicas a la imagen binaria resultante.
- Obtención de características de la imagen resultante (área, cuadro delimitador, centroide).
- Comparación de las coordenadas del ratón con las coordenadas de los objetos para conocer el tiempo de exploración.
- Si el roedor está cerca de un objeto determinado se incrementa la variable de tiempo de exploración en ese objeto. En caso contrario, la variable permanece sin cambio.
- Se almacena las coordenadas del centroide para conocer la ubicación del animal.
- Se muestra las gráficas obtenidas los tiempos de exploración.
- Se muestra el gráfico de la frecuencia en la que está el roedor en una zona.

### 3. Resultados

El algoritmo arroja el resultado obtenido al término del tiempo establecido a la fase de la prueba, guardando las variables deseadas por el investigador y generando gráficas que permitan conocer el comportamiento del animal de una manera más práctica.

El tiempo de exploración es mostrado a través de gráficas para la comodidad del usuario. En la figura 5 se muestran los valores obtenidos en una de las pruebas, donde se observa considerablemente que la mayor parte del tiempo el ratón exploró la periferia del entorno (caja de exploración), además de que el tiempo de exploración fue mayor en el objeto nuevo que en objeto conocido. Esto nos indica la cantidad de información que puede recordar el roedor, permitiendo analizar la memoria que tiene cada animal, ya sea memoria a corto o a largo plazo. Esto depende de la fase del entrenamiento a la que es sometido, donde las fases que evalúan la memoria a corto plazo se realizan con descansos de 10 minutos aproximadamente y las de largo plazo con un descanso de 24 horas [8].

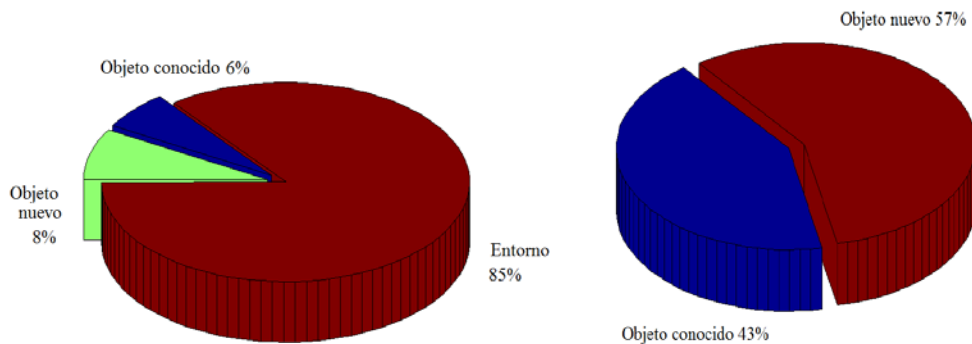


Figura 5 Tiempos de exploración en cada uno de los objetos.

El roedor siempre es rastreado para evitar tener fallas en el algoritmo, de esta manera en todo momento sabemos su ubicación y el usuario puede notar el comportamiento del ratón. El área del animal nos permite conocer la acción que está realizando, por ejemplo, un área más grande indica que el ratón se encuentra probablemente corriendo, mientras que un área pequeña indica que se encuentra en reposo. En la figura 6 se observa como varía el área de la caja delimitadora de

nuestro objetivo, además de que se observa la coordenada de su centroide, el cual nos proporciona la información de las zonas donde más está explorando [9]. En la tabla 2 se muestran los tiempos que invirtió el primer roedor en cada uno de los objetos dependiendo la fase a la que se encontraban.

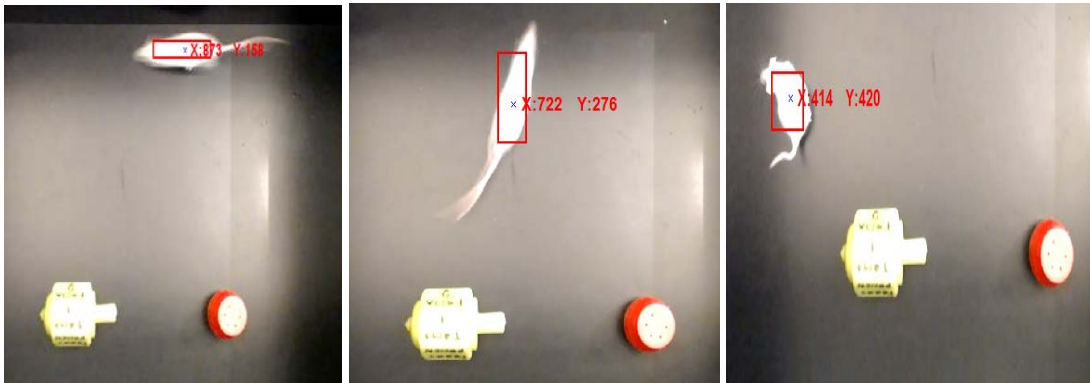


Figura 6 Rastreo del roedor a través de sus coordenadas.

Tabla 2 Tiempos de exploración en cada objeto.

Roedor 1	Objeto A	Objeto B	Objeto C	Objeto D
Fase 1 Corto plazo	18.7143 s	25.1429 s	Sin datos	Sin datos
Fase 2 Corto plazo	8.4286 s	Sin datos	45 s	Sin datos
Largo plazo	37.7143 s	Sin datos	Sin datos	40.7143 s

La frecuencia con la que el ratón está en una zona es otro factor que resulta importante a la hora de analizar su comportamiento, ya que nos indica las partes de la caja donde más está explorando el roedor y las zonas donde prácticamente no se acerca mucho. Obsérvese la figura 7, donde se aprecia que la exploración se lleva a cabo en su mayoría del tiempo en el perímetro de la caja y en las esquinas de la misma, ignorando en su mayor parte del tiempo a los objetos, lo cual coincide con la gráfica mostrada en la figura 5, tomando como 85% el tiempo invertido en explorar su entorno. También se muestran en recuadros verdes las zonas donde se encuentran colocados los objetos, viéndose como el ratón ocupa parte de su tiempo para acercarse a los objetos y explorarlos desde diferentes ubicaciones, prácticamente rodeándolos a lo largo de toda la prueba [10].



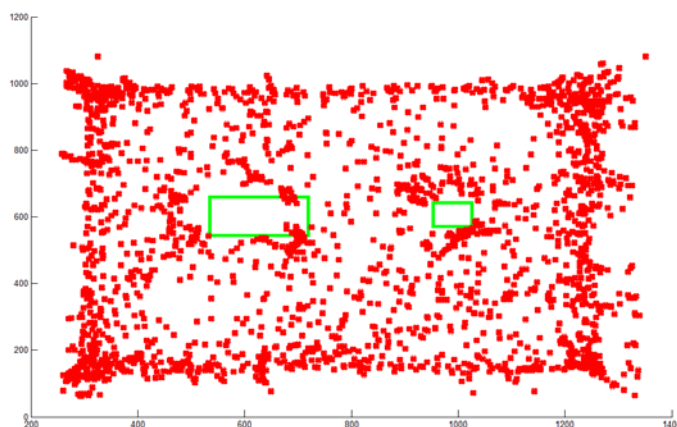


Figura 7 Frecuencia con la que el ratón está en una zona.

#### 4. Discusión

Al analizar 6 videos de las pruebas de memoria de corto plazo, arrojaron datos más precisos a los medidos manualmente por un investigador, debido a que las variables de tiempo son medidas en milisegundos y nos proporciona la frecuencia a las que el ratón está dentro de una zona. Obteniéndose un buen resultado en los videos procesados, ya que segmenta adecuadamente los objetos a los que es sometido y lleva una buena medición de las variables deseadas.

La principal ventaja del algoritmo es que el investigador no tiene que estar atento todo el tiempo a lo que realice el ratón debido a que cada instante su ubicación es almacenada, haciendo que algo tan difícil de observar sea más fácil de obtener, como la trayectoria y las zonas donde más se encuentra el animal, por la única razón de que el roedor se mueve de manera muy rápida y que durante 5 minutos puede existir una gran pérdida de información.

Por último, es importante mencionar que el algoritmo está limitado a roedores albinos, debido a que todas las pruebas se realizaron con esta característica en los animales, además de que es capaz de repetir los datos arrojados siempre y cuando se conserven las mismas condiciones iniciales. Se sometieron 3 ratones albinos a pruebas para analizar memoria a corto y largo plazo, con la misma duración de sus fases y misma duración en el tiempo de descanso, observando resultados muy diferentes entre cada animal, ya que al ser seres vivos tienen reacciones de maneras diferentes, las cuales fueron detectadas en el programa.

## **5. Conclusiones**

A lo largo de esta investigación se puede llegar a la conclusión que es factible aplicar el algoritmo propuesto para este tipo de pruebas de conducta en animales, debido a que se presentan condiciones favorables para la segmentación del animal y de los objetos presentes en las pruebas. Es muy importante considerar que la iluminación juega un papel muy importante dentro de la prueba, debido a que se está considerando un valor de intensidad lumínica fijo, qué en caso de no cumplirse, el código tiende a fallar por la falta de capacidad de eliminar el ruido ocasionado por otro nivel de iluminación, además de que la iluminación es un factor que podría afectar el comportamiento del animal, y por lo tanto, arrojar datos erróneos de lo que se desea analizar en el área de la neurociencia.

El algoritmo tiene una buena capacidad de seguimiento del roedor, obteniendo una información correcta de la posición y de su área, aunque presenta pérdida del seguimiento justo cuando su comportamiento es pararse en las esquinas de la caja. Por la forma en cómo está colocada la cámara, cuando el ratón se para en la unión de dos paredes, la segmentación presenta un error, debido a que divide en dos zonas al objetivo: su cabeza y su cuerpo. Una vez que el animal tiene las cuatro patas en la base de la caja, recupera su ubicación y la información de su área, lo cual no interfiere en los tiempos de exploración de los objetos, ya que se sabe que cuando existe una pérdida de información es porque se encuentra parado en una de las esquinas.

El conteo del tiempo es mucho más preciso con la ayuda del algoritmo que en una prueba común, debido a que como analiza fotograma por fotograma, tiene la capacidad de llevar la cuenta en milisegundos, logrando una mayor resolución de medición del tiempo y llevando unos datos estadísticos más completos de la ubicación del roedor.

Como trabajo a futuro se pretende diseñar un sistema de visión e iluminación adaptado específicamente a las condiciones de la caja de exploración, con la finalidad de lograr una iluminación más uniforme sobre todo el campo visual de cámara, que ayude a segmentar con mayor facilidad los objetos y sin interferir el comportamiento del roedor.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] T. Charoenpong, Y. Promworn, P. Thangwiwatchinda, W. Senavongse. "An Experimental setup for measuring distance and duration of rat behavior". The 2012 Biomedical Engineering International Conference. 2012.
- [2] R. Farah, P. Langlois, G.A. Bildeau. "Catching a Rat by its Edglets". Transactions on image processing. Vol. 22. No. 2. 2013. 668-677.
- [3] Y. Nie, I. Ishii, K. Yamamoto, T. Takaki, K. Orito, H. Matsuda. "High-Speed Video Analysis of Laboratory Rats Behaviors in Forced Swim Test" 4<sup>th</sup> IEEE Conference on Automation Science and Engineering. 2008. Pp. 206-2011
- [4] C. P. Sánchez Olguín. "Estudio Neuromorfológico y conductual del efecto de la cerebrolisina en ratas con separación materna parcial". 2010. Páginas 74
- [5] F., Navarrete, J. Pérez-Ortiz, T. Femenía, M. García-Gutiérrez, M. García-Paya. "Métodos de evaluación de trastornos cognitivos en modelos animales". Revista de Neurología. 2008. Pág. 140
- [6] E. Moscardo, B. Salvetti, S. Becchi, G. Bertini, P.F. Fabane. "The novel object recognition test in rodents: which are the essential methodological aspects?". Proceedings of measuring behavior. 2012. Pp. 476-478
- [7] O. Marques. "Practical image and video processing using Matlab". 2011. John Wiley & sons. New Jersey.
- [8] F. Magani, A. Damianich, G. Duaip, D. Rojo. "Reconocimiento de objetos por color en ratones *Mus musculus* cepa C57BL/6". Revista argentina de ciencias del comportamiento. Vol 5. No 3. 2013. Pp. 24-29.
- [9] C. Pérez López. "Matlab y sus aplicaciones en las ciencias y en la ingeniería". 2002. Pearson. Madrid.
- [10] E. Cuevas, D. Zaldívar, M. Pérez. "Procesamiento digital de imágenes usando Matlab & Simulink". 2010. RA-MA. Madrid.

## 7. Autores

Jorge Manuel Santa Bárbara Cebada, estudiante de la Ingeniería en Mecatrónica en la Facultad de Ciencias de la Electrónica, BUAP.

Dr. Aldrin Barreto Flores, estudió en el Instituto Tecnológico de Veracruz obteniendo el grado de Ingeniero en Electrónica en el año de 1998. Realizó estudios de Maestría en Ciencias de la Electrónica en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en el año 2000, posteriormente en la misma Institución obtuvo el grado de Doctor en Ciencias en el área de Ciencias de la Computación en el año 2005. Sus áreas de interés son visión por computadora, sistemas embebidos y aplicaciones en la industria.

Dra. María Isabel Martínez García, estudió en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla obteniendo el grado de Químicofarmacobióloga Ingeniero en 1986. Realizó estudios de Maestría en Farmacología Conductual en la Universidad Autónoma Nacional de México, 1994, posteriormente en la misma Institución obtuvo el grado de Doctora en Neurobiología en 2003. Sus áreas de interés son la neuroquímica del aprendizaje y la memoria.

# **DISEÑO DE UN ALGORITMO DE SEGMENTACIÓN DE OBJETOS Y CARRETERAS, ENFOCADO A SISTEMAS DE ASISTENCIA VEHICULAR**

***Juan Luis Burgos Bonilla***

Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
*juanluisburgosbonilla14@gmail.com*

***Luis Alberto Morales Rosales***

Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
*lamorales@itsm.edu.mx*

***Ignacio Algreto Badillo***

Universidad Politécnica de Tlaxcala  
*ignacio.algreto@uptlax.edu.mx*

## **Resumen**

Los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) son sistemas encargados de asistir al piloto en el proceso de conducción. Investigaciones recientes han demostrado que estos sistemas pueden prevenir hasta el 42% de los accidentes. Estos sistemas son desarrollados principalmente con visión artificial porque permite emular el comportamiento humano para analizar el entorno. Uno de los principales problemas para utilizar la visión por computadora es la segmentación, debido a que la carretera es un ambiente dinámico en el cual no se pueden aplicar técnicas tradicionales como la segmentación bimodal y obtener excelentes resultados. En este trabajo se presenta un algoritmo de segmentación de objetos en carretera, el cual consta de extracción de todas las regiones de la escena y análisis de muestras de la imagen para separar la carretera de todos los posibles objetos de interés, donde se demuestra que el principal inconveniente para la segmentación son las sombras. El algoritmo propuesto se pone a prueba en diferentes escenarios, donde presenta un 81.89%

de segmentaciones correctas de la carretera en distintas superficies y diferentes situaciones de iluminación.

**Palabra(s) Clave(s):** Algoritmos de extracción de regiones, segmentación, visión por computadora.

## **1. Introducción**

Los sistemas avanzados de asistencia al conductor (*Advanced Driver Assistance Systems ADAS*) son soluciones tecnológicas aplicadas a automóviles que se encargan de monitorizar el ambiente para detectar riesgos y apoyar en el proceso de conducir, por lo tanto elevan la seguridad del pasajero, vehículo y en general todo el ambiente vial. Gracias a estos avances tecnológicos la sociedad puede contar con herramientas con el potencial de prevenir hasta un 42% de los accidentes de tránsito, además que también pueden ayudar a tener una mayor eficiencia de combustible y reducir contaminantes [14].

Los ADAS han sido desarrollados con una gran variedad de sensores como láser, infrarrojos, sonares, entre muchos otros, pero el sensor sobresaliente es la cámara porque permiten utilizar la visión artificial, misma que intenta emular la vista humana, la cual, le da una ventaja a los ADAS, porque la mayor parte de la información requerida para la toma de decisiones mientras se conduce es visual.

El potencial de la visión artificial es significativo en los ADAS pero la dificultad de su desarrollo la coloca dentro de las tareas más complejas de la computación. Su complejidad es lo que limita el tiempo de análisis, manteniendo un límite de velocidad de 40 km/h para que los sistemas funcionen adecuadamente. Por lo tanto el desarrollo de nuevos algoritmos más rápidos y el disminuir la complejidad de los existentes son los objetivos de las ciencias computacionales.

Uno de los componentes principales de la visión artificial es el procesamiento de imágenes, el cual es un conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales para mejorar o facilitar la búsqueda de información. El tratamiento de imágenes se divide en tres partes: pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

El pre-procesamiento se basa en la aplicación de distintas técnicas como filtrado, transformación a escala de grises, ecualización, convolución, realce de bordes, etc. La meta fundamental es mejorar ciertas características que favorezcan las futuras operaciones sobre la imagen. En la carretera la luz, vibración y la temperatura pueden generar ruido en la captura de la imagen, por lo cual los objetos pueden estar sujetos a irregularidades que deben ser tratadas.

En la etapa de procesamiento se estudian las formas, texturas y colores que se encuentran en la imagen. Las técnicas empleadas para analizar y extraer las características se basan en la segmentación, que es la descomposición de la imagen. La segmentación es un paso muy importante porque en esta etapa es donde se selecciona la información de interés, pero el descomponer la imagen puede ser una tarea muy complicada porque en muchos casos las técnicas básicas como la segmentación bimodal no generan buenos resultados y son necesarios grandes cálculos y recursos computacionales para realizar la tarea.

Existen otras técnicas actuales que se han generado en investigación para obtener la segmentación como los algoritmos basados en vecinos, los cuales ofrecen mejores resultados para segmentar en distintos niveles, cuya función principal es hacer crecer las regiones de píxeles iterativamente utilizando comparaciones entre píxeles con una medida de similitud.

Pese al potencial de los algoritmos de segmentación por vecindario, tienen una gran cantidad de desventajas al aplicarlos a la carretera. Debido a los entornos dinámicos, iluminación variante y vibración, los algoritmos tienen desventaja porque son muy sensibles al ruido, dependen del punto de inicialización para generar una buena o mala segmentación y al ser iterativos tienden a consumir mucho recurso computacional.

Una de las tendencias en las ciencias computacionales es el desarrollar algoritmos de segmentación que faciliten la información para su interpretación en el post-procesamiento, ya que si se generan algoritmos más eficientes es posible aumentar la precisión y disminuir la complejidad computacional. Éste es el objetivo principal del trabajo presente, ya que se deben proporcionar algoritmos primitivos

para la realización de procesos cuyo resultado tiene una implicación importante en los procesos de la visión artificial.

El post-procesamiento se utiliza para interpretar y analizar los resultados. En esta etapa se emplean técnicas de reconocimiento de patrones para la representación numérica de los resultados de la segmentación. Esta etapa depende completamente de la calidad de la segmentación de la información, por lo tanto si la segmentación no es buena, la precisión de la interpretación de los resultados será nula. Y ésta es una de las grandes necesidades que resuelve el trabajo propuesto, generando resultados esenciales para el reconocimiento de objetos en la carretera.

Debido al gran problema que representa el segmentar la carretera para extraer las áreas y objetos de interés se han implementado soluciones existentes que de manera estratégica buscan adecuarse a las condiciones de la carretera. Dentro de los métodos de mayor popularidad se encuentran los que se basan en representar la carretera con una función que describa los píxeles que la conforman [1] [6] [11], esto permite extraer todos los objetos que se puedan encontrar dentro de ella. Uno de los inconvenientes son las sombras porque pueden afectar significativamente la segmentación. Existen cálculos estadísticos para reducir sombras [12] que pueden mejorar la detección de la carretera pero con el riesgo de pérdida de información al procesar la imagen.

Otro método para segmentar la carretera es analizar muestras, las cuales pueden ser valores obtenidos directamente de la imagen o del análisis de la textura en pequeñas áreas [7] [8], esto permite diferenciar la carretera de los objetos y pueden eliminarse algunas sombras.

Debido a la complejidad de eliminar sombras y determinar el área de interés se ha incrementado el desarrollo de sistemas basados en análisis de líneas para seleccionar el carril [2] [3] [5] [6] [9] [10] [11], que: a) utilizan información proporcionada por operadores como Sobel [2] [3] y Canny [10] [11] para extraer bordes y b) utilizan la transformada de Hough [2] [3] [6] para seleccionar y discriminar las líneas. Una de las opciones para mantener un seguimiento en las



líneas y proporcionar una perspectiva continua del área de interés es utilizar técnicas de seguimiento como el filtro Kalman [2].

Por otro lado se encuentra la búsqueda basada en conocimiento [4] [5] [9] [11], la cual utiliza la información proveniente de las líneas en la carretera y/o de sensores láser [4] para reducir el área de búsqueda. La búsqueda consiste en analizar la forma de los objetos empleando extracción de características como HOG (*Histogram of Oriented Gradients*) [4] [5] y clasificadores como SVM (*Support Vector Machines*) [5] [9] [11]. Éste método es robusto para detectar y discriminar objetos, pero el inconveniente es el alto costo computacional que se requiere para realizar la detección.

Todos los trabajos previos muestran que la segmentación de la carretera es un problema con una tasa de detección muy baja, donde las condiciones del medio son impredecibles y no es posible aplicar una técnica a todos los escenarios, por ello algunos buscan una solución estudiando bordes y colores, mientras que otros buscan una solución reconociendo cada objeto.

Independientemente de la técnica a emplear, la segmentación es primordial, por ello en este trabajo se presenta un algoritmo para la segmentación de todos los objetos en carretera basada en extracción de regiones y análisis de muestras para separar la carretera de todos los objetos presentes en la escena.

## 2. Desarrollo

La metodología propuesta consta de una cámara y una computadora a bordo del automóvil, la cámara es posicionada de manera estratégica en el interior junto al espejo retrovisor, lo que permite tener una perspectiva adecuada del frente del automóvil y estar protegida del viento que puede causar vibración. La figura 1 muestra de manera general los bloques que conforman al sistema.

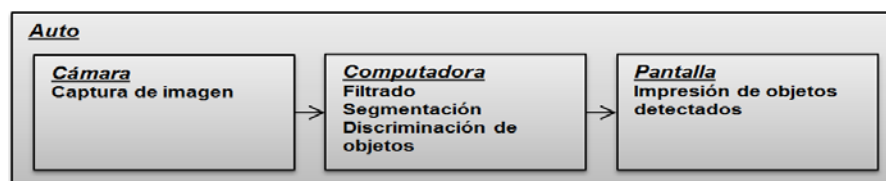


Figura 1 Diagrama general del sistema.

La carretera es un ambiente en constante cambio y en cada fotograma se encuentran variaciones en los objetos, además de cambios de iluminación, por lo tanto es necesario segmentar cada imagen, para extraer las regiones y eliminar todas aquellas regiones que conformen la carretera. La figura 2 muestra el proceso de segmentación, el cual se aplica a cada imagen.

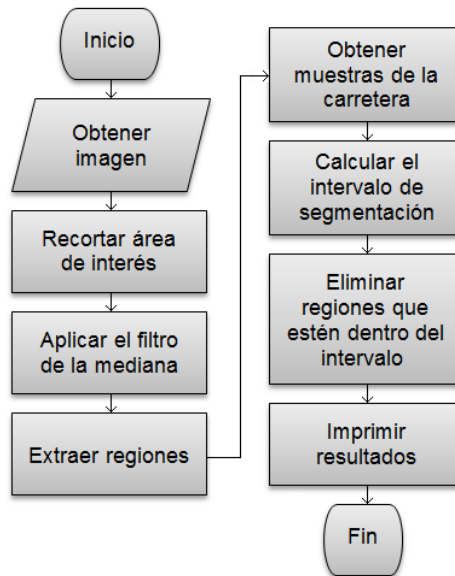


Figura 2 Diagrama de flujo del proceso de segmentación.

Después de obtener la imagen original como se muestra en la figura 3, se recortan los bordes innecesarios de la imagen original como muestra la figura 4a y se selecciona el área de interés, que se puede describir con un trapecio, debido a que es la forma como se puede apreciar la carretera. Utilizando un trapecio como se ve en figura 4b, se pueden eliminar los laterales y la mayor parte del cielo, de esta manera el número de datos a procesar se reduce un 30%.



Figura 3 Imagen original.



Figura 4 Determinación del área de interés.

Uno de los principales inconvenientes al obtener imágenes en carretera es que están expuestas al ruido, por eso se propone utilizar el filtro de la mediana porque permite remarcar bordes mientras se suaviza la imagen.

Para extraer las regiones, se crea una matriz acumuladora para guardar la etiqueta de la región de cada pixel y debe tener el mismo tamaño que la matriz de los datos, donde sólo el pixel (2,2) tiene el valor uno y el resto en ceros. Se menciona que al final del proceso, esta matriz contendrá valores que van del 1 a  $k$ , donde  $k$  representa el número de regiones encontradas en la imagen.

El proceso para asignar cada pixel a una región requiere realizar una comparación de cada pixel con sus 6 vecinos como muestra la figura 5. El realizar la clasificación de esta manera asegura que la segmentación siempre sea la misma al aplicarla varias veces en la misma imagen, esto permite tener una menor variación de resultados cuando se trabaja en secuencia de imágenes.

225	225	225	91	91	91	91
225	225	225	91	91	91	91
225	91	91	91	91	91	91
225	225	225	91	91	155	155
122	122	122	91	91	155	155
122	122	122	91	91	155	155
122	122	122	91	91	155	155

Figura 5 Matriz de datos con selección de vecinos del pixel (2,2).

Se debe comparar la similitud del pixel actual con cada uno de los pixeles vecinos y guardar el parentesco con verdadero "T" o falso "F" como muestra la figura 6.

T	T	T
T	255	T
T	F	F

Figura 6 Matriz de parentesco.

De la matriz acumuladora se toma el número de región de los vecinos similares y del pixel actual, para posteriormente extraer la moda. La figura 7 ejemplifica la selección de vecinos en la matriz de regiones en base al parentesco.

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7 Selección de los valores de los vecinos y del pixel actual.

Se calcula la moda para obtener la región más sobresaliente del vecindario, el nuevo valor a asignar al pixel actual y a sus vecinos como muestra la figura 8.

1	1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 8 Actualización del número de región del pixel actual y de sus vecinos.

El utilizar la moda para actualizar las regiones previamente asignadas ayuda a reacomodar cada pixel a la región que tenga un número mayor de vecinos, lo cual obliga a separar las regiones colindantes que tengan bordes parecidos. La figura 9 muestra el resultado de realizar la asignación de región para todos los pixeles.

1	1	1	2	2	2	2
1	1	1	2	2	2	2
1	2	2	2	2	2	2
1	1	1	2	2	3	3
4	4	4	2	2	3	3
4	4	4	2	2	3	3
4	4	4	2	2	3	3

Figura 9 Asignación final de regiones.

El proceso anterior esquematizado con las matrices muestra el funcionamiento del algoritmo de extracción de regiones, el cual está definido en el Pseudocódigo 1:

```

funcion Extraer_Regiones(datos)
  establecer filas, columnas = tamaño(datos)
  establecer regiones(filas, columnas) = 0
  establecer region = 1
  establecer matriz(1,1) = region

  establecer umbral = n
  hacer j = 2 hasta columnas-1
    hacer i = 2 hasta filas-1
      asignar varvecinos = vecinos(|matriz(i,j)-vecino|<umbral)
      asignar varregiones = regiones(varvecinos)
      si varregiones = 0
        asigna varmoda = region
        asigna region = region + 1
      si no
        asigna varmoda = calcularmoda(varregiones)
      fin si
      asigna regiones(varvecinos) = varmoda
    fin hacer
  fin hacer
  salida regiones
fin de funcion
    
```

Para seleccionar el intervalo de umbralización se obtienen muestras de distintas coordenadas de la imagen. Se emplea una máscara en forma de trapecio como muestra la figura 10. El trapecio obliga a seleccionar en su mayoría pixeles que están dentro de la carretera, esto se debe a que se ajusta a la forma de la carretera desde la perspectiva de la cámara.

116	115	114	25	25	24	25	25	11	9	11
114	116	23	25	26	23	26	26	25	10	11
115	23	26	23	201	202	103	25	26	23	9
24	25	26	23	202	203	200	24	23	24	23
24	26	26	201	205	203	204	203	25	23	26
23	23	25	26	24	24	24	26	24	25	24
24	24	24	26	25	24	26	26	26	25	24
24	25	25	25	23	26	23	25	23	23	26

Figura 10 Selección de muestras en la matriz de datos.

En la figura 11 se observa que las muestras obtenidas se ordenan de manera ascendente y se separan en segmentos de datos parecidos.

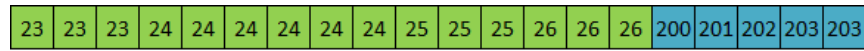


Figura 11 Muestras ordenadas.

La asignación de segmentos se realiza mediante la diferencia de un valor actual y el anterior. Si su diferencia es menor que el umbral  $N$  entonces quiere decir que pertenecen al mismo segmento. Este método permite incrementar el intervalo de segmentación y por lo tanto describir mejor la carretera. Esta forma de ordenar datos y clasificar segmentos es una de las aportaciones de este trabajo que mejora la segmentación debido a que busca un conjunto de valores similares dependiendo de  $N$ . En la figura 11 se tienen dos intervalos de umbralización de acuerdo a los valores obtenidos de la muestra.

La condición para seleccionar el segmento que describe la carretera, es que debe cumplir que sus valores comiencen en el origen inferior de la imagen y se encuentren dispersos, además de que sea el primero o el segundo segmento de mayor tamaño.

Para eliminar la carretera de la imagen se combina la extracción de regiones con el intervalo de segmentación. En este proceso se extraen las regiones donde sus valores tengan intersección con el intervalo umbral. La figura 12.a muestra la selección de regiones que pertenecen a la carretera.

Las regiones seleccionadas como pertenecientes a la carretera son eliminadas y de esta manera sólo quedan las regiones sobresalientes como se muestra en la figura 12.b.

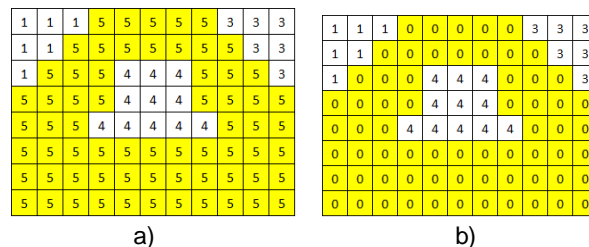


Figura 12 Selección de regiones con el intervalo de segmentación (a) y eliminación (b).

El proceso anterior esquematizado con las matrices muestra el funcionamiento del algoritmo de selección de muestras y eliminación de regiones, mismo que se explica en el Pseudocódigo 2:

```
funcion Eliminar_Regiones(datos, regiones)¶
¶
establecer_muestras = obtener_muestras(datos)¶
establecer_muestras_ordenadas = ordenar(muestras)¶
establecer_filas = tamaño(muestras_ordenadas)¶
establecer_acumulador(filas, 2) = 0¶
establecer_segmento = 0¶
establecer_umbral = N¶
asignar_acumulador((1-filas), 1) = muestras_ordenadas¶
¶
hacer i = 2 hasta tamaño(muestras_ordenadas)¶
si (acumulador(i, 1) - acumulador(i-1, 1)) > umbral¶
asignar_segmento = segmento + 1¶
fin si¶
asignar_acumulador(i, 3) = segmento¶
fin hacer¶
¶
establecer_segmentos = valores_unicos(acumulador((1-filas), 3))¶
hacer i = 1 hasta tamaño(segmentos)¶
asignar_dispersos = revisar_posiciones_en_acumulador(segmentos(i))¶
si dispersos = verdadero¶
asignar_carretera = segmentos(i)¶
fin si¶
fin hacer¶
¶
establecer_valores_carretera = buscar_valores(acumulador, carretera)¶
establecer_coordenadas = datos(valores_carretera)¶
establecer_regiones_carretera = buscar_regiones(regiones, coordenadas)¶
asignar_regiones(regiones_carretera) = 0, ¶
establecer_mascara = (regiones > 0) = 1¶
establecer_segmentacion = datos * mascara¶
salida_segmentacion¶
fin funcion¶
```

El algoritmo propuesto extrae todas las regiones existentes en la escena. El analizar el intervalo de valores que conforman a la carretera y combinarlo con las regiones detectadas, permite eliminar la carretera resaltando todos los objetos que pueden ser de interés, facilitando su análisis, lo que da pauta para la implementación de distintos algoritmos para interpretar o reconocer los objetos.

Por la generalización del método propuesto, es posible aplicarlo a carretera de cualquier color e incluso a carreteras rurales. El algoritmo de segmentación es importante en la detección de objetos en carretera, especialmente en situaciones donde hay sombra, no hay líneas pintadas o existen baches, que es algo recurrente en las carreteras de México. Así, el diseño e implementación del algoritmo es primordial para sistemas automatizados o inteligentes que permitan a un vehículo proporcionar seguridad o auto-guiarse.

### 3. Resultados

Los algoritmos fueron evaluados en dos conjuntos de imágenes:

- El primer conjunto de pruebas es denominado KITTI [14], proporcionado por el Instituto Tecnológico de Karlsruhe y el Instituto Tecnológico de Toyota, como un conjunto de pruebas enfocadas a la visión artificial aplicada a la detección de objetos en carretera.
- El segundo conjunto de pruebas fue obtenido de una cámara a bordo del automóvil en carreteras de la ciudad de México, Puebla y Tlaxcala. Este conjunto de imágenes contiene carretera de asfalto, pavimento y ladrillos, además de una gran diversidad en sombras y cambios de color en la carretera.

#### Base de datos KITTI

Consta de distintos conjuntos de imágenes enfocados a la segmentación de la carretera, seguimiento de objetos y reconocimiento de objetos. Todos los conjuntos tienen gran diversidad de situaciones como imágenes con sombras, cambios de luz, tráfico, entre otras, lo que hace a KITTI un test completo para evaluar fortalezas y debilidades de los algoritmos.

La base de datos para evaluar la segmentación de la carretera se conforma de 290 imágenes clasificadas en tres tipos:

- UU – calles sin líneas
- UM – calles con líneas
- UMM – calles con múltiples líneas

La figura 13 muestra un ejemplo de la aplicación de la metodología propuesta en una imagen del conjunto KITTI.

La mayor parte de las imágenes no contienen automóviles, por lo tanto sólo se evalúa la segmentación de la carretera. La tabla 1 muestra los resultados de la segmentación de carretera en las imágenes de KITTI.

En este conjunto se evaluó únicamente la calidad de la segmentación de la carretera. Observándose que la mejor segmentación se encontró en las carreteras de multicarril.



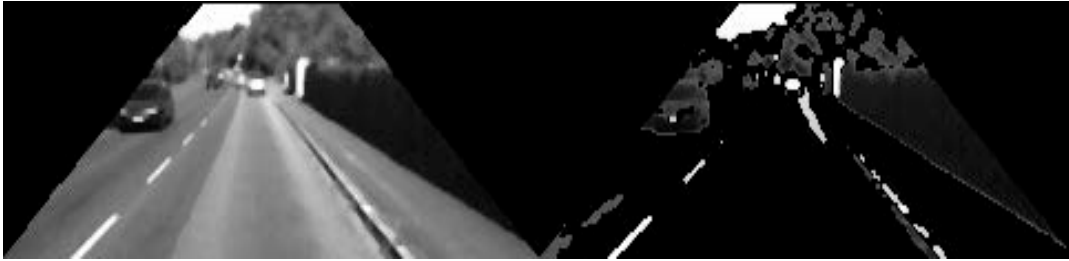


Figura 13 Ejemplo de aplicación del algoritmo a una imagen del conjunto KITTI.

Tabla 1 Resultados de eliminación de carretera en KITTI.

Clase	Segmentación
UU	50%
UM	74%
UMM	90%

### Base de datos de la cámara abordo

Con una cámara a bordo de un automóvil se recolectaron muestras de distintas situaciones en distintas horas del día, las cuales son:

- Carreteras con líneas y sin líneas
- Carreteras uniformes y con cambios de color
- Carreteras oscuras y claras
- Carreteras con sombras
- Automóviles en movimiento frente al automóvil y a los costados

Este conjunto se divide en dos tipos de carreteras:

- Carreteras de pavimento o asfalto.
- Carreteras de ladrillos.

### Resultados de imágenes de carretera de pavimento y asfalto

El conjunto de imágenes de carreteras con pavimento y asfalto consta de una colección de 1846 imágenes que contienen al menos uno o más automóviles. Las imágenes son clasificadas en 4 tipos:

- CU - carretera uniforme sin sombras
- CUS - carretera uniforme con sombras
- CC - carretera con cambios de color sin sombras

- CCS - carretera con cambios de color con sombras

La figura 14 muestra un ejemplo de la aplicación de los algoritmos operando sobre una imagen recolectada con la cámara instalada en el automóvil.

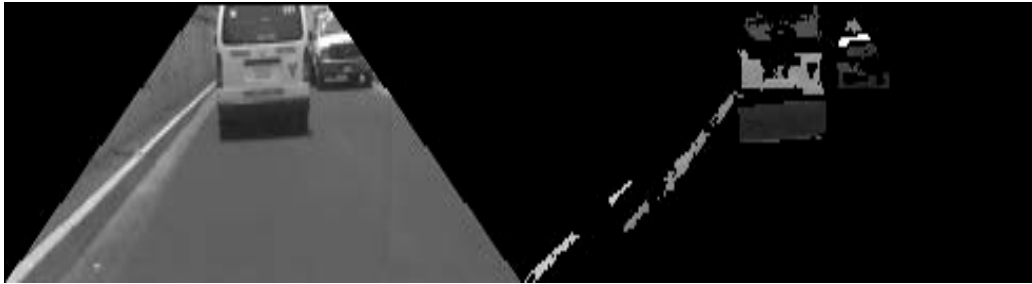


Figura 14 Ejemplo de segmentación a una imagen con asfalto.

En este conjunto se evalúa el número de veces que se segmenta correctamente un objeto en el número de imágenes donde aparece, por lo tanto se evalúan en secuencias de imágenes. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos de las dos clases:

- Automóviles en el frente
- Automóviles siendo rebasados

Tabla 2 Resultados de la segmentación continua de objetos en carretera.

Clase	Frente	Rebase
CU	90.99%	92.65%
CUS	57.14%	98.15%
CC	90.06%	97.00%
CCS	76.19%	72.73%

Este conjunto se encuentra mejor distribuido y en él se pueden apreciar de una manera clara, que las sombras son la principal debilidad de la segmentación.

### Resultados de imágenes de carretera de ladrillos

El conjunto de imágenes de carreteras de ladrillos consta de una colección de 740 imágenes. La figura 15 muestra un ejemplo de segmentación.



Figura 15 Ejemplo de segmentación a una imagen con ladrillos.

La mayor parte de las imágenes no contienen automóviles pero sí sombras. Para el conjunto se obtuvo el 86.49% de segmentaciones correctas de la carretera.

#### 4. Discusión

Los resultados descritos en la sección anterior muestran una mala segmentación en las imágenes que contienen sombra, principalmente todas aquellas donde las sombras cubren gran parte de la carretera, al tener un cambio significativo en el color, provoca que el algoritmo lo considere como un objeto ajeno a la carretera.

La tabla 1 muestra que las imágenes *UU* tienen una precisión del 50%, la mala detección no es a causa de no tener líneas de carril, esta se debe a que son carreteras de dos carriles y en su mayoría están rodeadas de árboles y edificios, los cuales generan sombras de gran tamaño.

En el caso de las *UMM* el alto índice se debe a que la mayor parte de carreteras tienen cuatro o más carriles, y por ser muy grandes, son menos afectada por la sombras.

La tabla 2 en su apartado *CUS – Frente* reporta que la tasa de detección es muy baja debido a que los objetos que se desplazan frente al automóvil pueden ser afectados por las sombras al moverse, por lo tanto, el objeto cambia su color constantemente. Si se compara toda la columna uno y dos de la tabla 2 es evidente que existe una mejor segmentación para los automóviles que están siendo rebasados, y esto es ocasionado por el acercamiento a los automóviles mientras se rebasan.

Para comparar resultados con investigaciones relacionadas se tomaron dos trabajos: el primero basado en conocimiento [4] y el segundo basado en valores de pixeles [6].

La figura 16 muestra la comparación del trabajo [4] con el presentado. En esta figura se compara la tasa de detección de los automóviles.

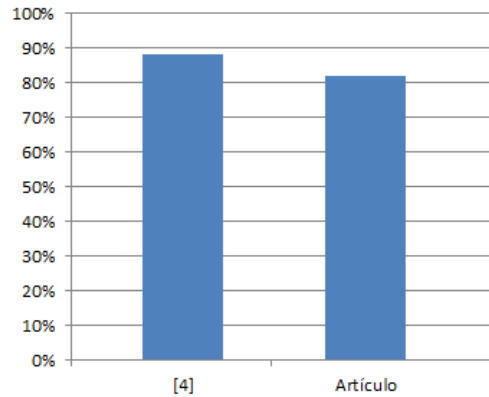


Figura 16 Comparación de resultados en detección de vehículos.

Los resultados del trabajo [4] sobresalen en comparación al algoritmo propuesto debido a que analiza el objeto con sensor láser y cámara, teniendo la ventaja de que el láser no es afectado por las sombras como es en el caso del trabajo presente, aunque [4] tiene un alto costo computacional por el descriptor de HOG y Haar-like.

La figura 17 muestra la comparación del trabajo [6] con el presentado. En esta figura se compara la tasa de segmentación de la carretera.

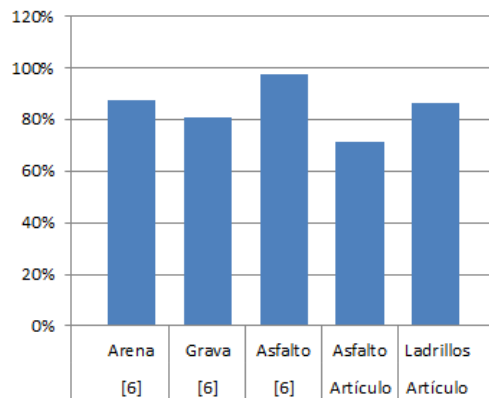


Figura 17 Comparación en resultados de segmentación de carretera.

Los resultados del trabajo [6] son superiores en comparación del algoritmo propuesto, esto puede deberse a que la colección de resultados reportados del trabajo [6] no demuestra tener segmentación con presencia de automóviles, mientras que el trabajo presente, se reporta en su mayoría imágenes con vehículos.

El que existan automóviles en la carretera dificulta la segmentación porque la información de la carretera se reduce en función al área que ocupe el vehículo dentro de ella. El área que puede ocupar un vehículo dependerá de la distancia de observación de la cámara.

## **5. Conclusiones**

Uno de los principales problemas para realizar una segmentación de la carretera son las sombras, porque ellas afectan significativamente al sistema. Son un problema difícil de solucionar porque dependiendo el tipo de carretera (obscura, clara) es como se pueden percibir. Las sombras claras son hasta cierto punto fácil de tratar pero las oscuras son muy difíciles porque la similitud con la carretera es nula, por lo tanto se puede interpretar como un objeto ajeno a la carretera. Por otro lado, la carretera muy clara, se comporta de forma similar a las sombras. Al ser la superficie muy clara, la luz que se refleja puede cambiar la percepción del color de la carretera a una gran distancia y el sistema puede confundirse de manera similar al caso de las sombras.

El utilizar formas para delimitar áreas de interés, por ejemplo trapecios para el caso de intentar ajustar el área de la carretera, pueden reducir estratégicamente el área de búsqueda, principalmente porque permite descartar información de manera rápida y evitar cálculos y análisis en zonas que no contienen información de importancia.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Y. Xia, M. Huang, W. Cui, F. Wang, X. Chen, "A Novel On-Road Object Detection Approach Based on Vision". 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Abril 2009. Pp. 440 – 443.

- [2] Y. Wang, W. Deng, S.Zhang, Y. Zhang, "A lane departure warning system developed under a virtual environment". *Informative and Cybernetics for Computational Social Systems*. Octubre 2014. Pp. 63 – 67.
- [3] M. Hammond, G. Qu, O. A. Rawashdeh, "Deploying and Scheduling Vision Based Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) on Heterogeneous Multicore Embedded Platform". *2015 Ninth International Conference on Frontier of Computer Science and Technology*. Agosto 2015. Pp. 172 – 177.
- [4] F. Garcia, A. Ponz, D. Martin, A. de la Escalera, J. M. Armingol, "Computer vision and laser scanner road environment perception". *IWSSIP 2014 Proceedings*. Mayo 2014. Pp. 63 – 66.
- [5] Y. Deng, H. Liang, Z. Wang, J. Huang, "An integrated forward collision warning system based on monocular vision". *Robotics and Biomimetics (ROBIO)*. Diciembre 2014. Pp. 1219 – 1223.
- [6] Z. Wan-zhi, W. Zeng-cai, "Rural Road Detection of Color Image in Complicated Environment". *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*. Vol. 6. No. 6. 2013. Pp. 161 – 168.
- [7] J. M. Álvarez Álvarez, A. M. López, "Road Detection Based on Illuminant Invariance". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 12. Octubre 2010. Pp. 184 – 193.
- [8] S. Graovac, A. Goma, "Detection of Road Image Borders Based on Texture Classification". *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Vol. 9. Octubre 2012. Pp. 242.
- [9] S. Zhou, J. Gong, G. Xiong, H. Chen, K. Iagnemma, "Road detection using support vector machine based on online learning and evaluation". *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Junio 2010. Pp. 256 – 261.
- [10] R. Chen, H. Xiao, X. Dou, W. Hou, "Research on Recognition Methods of Bus Front Road Condition Based on Video". *Image and Graphics (ICIG), 2013 Seventh International Conference*. Julio 2013. Pp. 439 – 442.
- [11] M. A. Sotelo, J. Nuevo, L. M. Bergasa, M. Ocana, I. Parra, D. Fernandez, "Road Vehicle Recognition in Monocular Images". *Proceedings of the IEEE*

- International Symposium on Industrial Electronics. ISIE 2005. Junio 2005. Pp. 1471 – 1476.
- [12] B. Wang, V. Frémont, “Fast road detection from color images”. Intelligent Vehicles Symposium (IV). Junio 2013. Pp. 1209 – 1214.
- [13] J. Fritsch, T. Kuehnl, A. Geiger, “A New Performance Measure and Evaluation Benchmark for Road Detection Algorithms”. International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). 2013.
- [14] Aria Etemad, euroFOT study demonstrates how driver assistance systems can increase safety and fuel efficiency. 2012.

## **7. Autores**

El Ing. Juan Luis Burgos Bonilla es ingeniero en sistemas computacionales egresado y actualmente estúdiante de posgrado del Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Su línea de investigación se enfoca en la visión artificial y el procesamiento de imágenes.

El Dr. Luis Alberto Morales Rosales es egresado del INAOE en el área de Ciencias Computacionales. Actualmente, es coordinador del posgrado en sistemas computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Las líneas de investigación que desarrolla son cómputo móvil y cómputo inteligente. En particular, se enfoca en el desarrollo de algoritmos de orden parcial difuso para la coordinación de eventos en entornos distribuidos, el desarrollo aplicaciones inteligentes para educación especial y explora la minería de datos aplicada a la toma de decisiones.

El Dr. Ignacio Algreto Badillo recibió el grado por el INAOE en el 2008. Se ha desempeñado como profesor-investigador de tiempo desde el 2014 en la Universidad Politécnica de Tlaxcala. Él es miembro del SNI nivel 1 desde el 2011, tiene más de 80 artículos científicos, es revisor en varios comités nacionales e internacionales, es líder de varios proyectos y sus líneas de investigación son enfocadas en el diseño y desarrollo de sistemas digitales, arquitecturas reconfigurables, sistemas criptográficos, aceleración en hardware para aplicaciones específicas, y aplicaciones de robótica.

# **SÚPER RESOLUCIÓN Y MEJORA DEL ALGORITMO CANNY PARA LA DETECCIÓN DE BORDES EN IMÁGENES MÉDICAS**

***Jaime Sacramento Pérez Gutiérrez***

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
*james.perez@cenidet.edu.mx*

***Andrea Magadán Salazar***

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
*magadan@cenidet.edu.mx*

***Raúl Pinto Elías***

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
*rpinto@cenidet.edu.mx*

***Manuel Mejía Lavalle***

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
*mlavalle@cenidet.edu.mx*

## **Resumen**

La detección de bordes en imágenes es de suma importancia para encontrar objetos de interés en estas, especialmente si se trata de imágenes médicas, donde la búsqueda de cuerpos extraños es la actividad crítica para el médico al momento de analizar los estudios en imágenes del paciente. Sin embargo, normalmente las imágenes a examinar, presentan ruido que dificulta el proceso de diagnóstico. Por ello, en este artículo, se propone un sistema de Tratamiento Digital de Imágenes que mejore la resolución de imágenes de resonancia magnética (MRI) con técnicas de Súper Resolución (SR) y un algoritmo de detección de bordes, denominado CannySu, que consiste en el algoritmo de *Canny* en combinación con el algoritmo de Otsu para establecer valores de umbral



al detector de bordes. Los resultados obtenidos demuestran la efectividad de esta propuesta.

**Palabra(s) Clave(s):** Imágenes médicas, súper resolución, tratamiento digital de imágenes.

## **1. Introducción**

En la mayoría de las aplicaciones de Visión por Computadora (VA), es importante mejorar las condiciones de las imágenes originales para lograr resultados aceptables en cada una de las etapas. Una forma de contrarrestar algunos de estos problemas es mejorando la resolución de las imágenes. Existen distintas formas de hacerlo: el mismo dispositivo, es una forma bastante rápida y simple, aunque conlleva el incremento de los costos del dispositivo sensor; otra manera es mejorar la calidad de la imagen mediante un pre-procesamiento de la misma. El algoritmo de estimación para una imagen de alta resolución es conocido como Súper Resolución (SR), el cual inicia con imágenes de baja resolución (LR) para producir una o varias imágenes de mayor resolución con una notable mejoría en la calidad visual. Los algoritmos de (SR) son una alternativa, para obtener una imagen nueva con mayor resolución espacial con más y mejores detalles, permitiendo mejorar el proceso de detección de bordes en éstas. En este trabajo, se propone un sistema de Tratamiento Digital de Imágenes que mejore la calidad de imágenes de resonancia magnética a través de aumentar su resolución con técnicas de SR y se realice la mejor detección de bordes en ellas.

La principal aportación del presente trabajo es: comprobar la hipótesis de que se mejora la calidad visual de imágenes médicas con SR, de tal forma que se cuente con mayor cantidad de detalles y en evaluar la detección de bordes con el algoritmo propuesto, denominado CannySu, el cual pretende mejorar el resultado de detección de bordes usando Canny con un valor de umbral generado con Otsu. Actualmente, en la literatura del área se pueden encontrar trabajos de los cuales se enfocan en resolver las problemáticas de la baja resolución en imágenes. En [1] se puede encontrar la siguiente clasificación de las técnicas de SR:

- Técnicas del dominio de frecuencia.

- Técnicas del dominio espacial.
- Algoritmos iterativos.
- Métodos estadísticos.

Las técnicas del dominio de la frecuencia están basadas en el teorema generalizado de muestro. Estas se basan en utilizar efectos de *aliasing* en señales de banda limitada. Otro método [2] es el de dominio espacial, donde la imagen de alta resolución es creada usando interpolación sobre imágenes de baja resolución. La mayor parte de los métodos del dominio de la frecuencia realizan sus manipulaciones en el dominio transformado de Fourier.

El principal algoritmo iterativo para la SR, es el *iterative back projection* [3]. En este algoritmo, la imagen de salida de alta resolución es construida de manera iterativa para describir mejor las imágenes de entrada. En cada paso del algoritmo se genera un conjunto de imágenes de baja resolución. La proyección es hecha teniendo en cuenta la mejor selección de la imagen de SR. En todos los pasos, el algoritmo redefine la mejor imagen deducida.

Por otro lado los métodos estadísticos buscan obtener una imagen de alta resolución con la máxima probabilidad de “crear” las imágenes de entrada de baja resolución (acorde al modelo de la imagen). Tales algoritmos usan el teorema de Bayes y los campos aleatorios de Markov para modelar y llegar a la solución deseada.

En [4] propusieron un algoritmo de SR usando la norma  $L1$  con propósito de mejorar la calidad de un conjunto de imágenes borrosas, demostrando un desempeño mejorado en comparación con otras técnicas al remover el ruido de forma eficiente, dando como resultado imágenes con bordes más claros.

En [5] se propuso una aproximación similar aplicando la norma  $L1$  con un método de flujo óptico de alta precisión, el cual se basa en una relajación cuadrática.

Por otra parte, en [6] se proponen dos aproximaciones para contrarrestar los problemas de regiones faltantes en imágenes de baja resolución y los largos tiempos de adquisición de datos. La primera consiste en una SR Integrada junto con una aproximación de reconstrucción de las partes deterioradas. En la segunda

aproximación, se facilita la reconstrucción del rango de datos desde medidas muy escasas. Esta técnica aprovecha una parte de la segmentación proveniente de una imagen óptica de la misma escena, la cual contiene píxeles en el mismo segmento de color para tener un rango similar de valores.

En [7], la aproximación se basa en una técnica de dominio de la frecuencia. Esta técnica fue utilizada con el método de supresión de ruido en 2D de Gabor, aplicada en problemas de resolución en la biometría del iris.

En [8] se propuso un nuevo método para determinar los parámetros en problemas de SR reguladas. Esta propuesta se basa en la técnica de estimación JMAP (*Joint maximum a posteriori*), la cual es mejorada al ser estabilizada mediante el planteamiento de una densidad probabilística gamma de los hyper-parámetros de manera que produzca un algoritmo estable con una única solución global. El método propuesto es aplicable en la regularización de problemas de SR tradicionales con un solo parámetro y con múltiples de ellos, proveyendo un costo computacional bajo en imágenes con la misma calidad que las producidas por métodos clásicos.

Con respecto a la fase de detección de bordes, el algoritmo *Canny* se ha aplicado de manera tradicional para localizar bordes continuos y con el mínimo grosor. No obstante, estos aspectos no siempre se cumplen, debido a que este proceso de detección de bordes está limitado por la intensidad luminosa de la imagen analizada. Por ello, se siguen realizando investigaciones al respecto con interesantes aportaciones, como se muestran a continuación.

En [9] un nuevo algoritmo fue propuesto para mejorar el rendimiento de detección de bordes en *Canny* basándose en el concepto de lógica difusa, de manera que se calcule de forma automática la detección del umbral necesario para la imagen en cuestión. Este método es una aproximación para manejar incertidumbres en áreas de la imagen tales como la poca iluminación, lo que provoca que los límites de las regiones lleguen a volverse vagos. El esquema difuso propuesto minimiza la incertidumbre del procedimiento de detección de umbral, usando una técnica de indexado ultra-difuso.

En el artículo [10] se implementó el algoritmo de detección de bordes *Canny* con el propósito de mejorar imágenes en 3D para el estudio sísmico de la sub-superficie. En específico, para mejorar la visualización de los detalles estructurales y estratigráficos de las señales sísmicas y ayudar a amplificar las discontinuidades sutiles. El método propuesto está basado en una operación matemática que transforma las señales locales sísmicas no nulas para que sean nulas y luego transformar los datos de las señales a escala de grises para re-caracterizar las propiedades sísmicas con un significado no nulo en la variación de amplitud y emplear el algoritmo de *Canny* para ayudar a detectar, de manera más eficiente, los cambios de amplitud asociados con las discontinuidades.

Una aproximación similar al presente trabajo se realizó en [11] utilizando el algoritmo de detección de umbral Otsu para crear un método adaptativo automático para el algoritmo de detección de bordes *Canny*; mejorando la capacidad de restringir los bordes falsos y la automatización de la detección de bordes.

Finalmente, en [12] el algoritmo de *Canny* fue utilizado para la evaluación de las tallas en máscaras anti-gas y la detección de aperturas en éstas. La propuesta se basa en que en el proceso de evaluación, se examina el contorno de la cara y acorde a su dimensión en la imagen capturada, se selecciona la máscara que se ajuste mejor. El operador que se encarga de la detección de bordes en la imagen de la cara es el detector de bordes *Canny*.

En conclusión, las técnicas de SR son relativamente jóvenes pero con excelentes resultados para la resolución de problemáticas reales, sobre todo en el análisis de imágenes médicas. La combinación de estas técnicas, junto con la mejora o propuesta de nuevos algoritmos en la detección de bordes, podrían contribuir al desarrollo de mejores aplicaciones de tratamiento de imágenes en el área de la salud y de la medicina. En este trabajo, se aprovechan los algoritmos previamente mencionados para obtener una mejora al proceso de detección de bordes en las imágenes.

## 2. Desarrollo

A continuación, se detalla la técnica de SR, la selección automática del umbral y la detección de bordes que se usaron para este trabajo, junto con el desarrollo de las pruebas en las imágenes.

### Súper Resolución

El algoritmo utiliza un método de interpolación usando como solucionador no-lineal el algoritmo de Gauss-Newton[13]; el cual consta de lo siguiente:

- Dadas  $m$  funciones  $r = (r_1, \dots, r_m)$  –comúnmente llamadas residuales– de  $n$  variables  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_n)$ , con  $m \geq n$ , el algoritmo de Gauss-Newton encuentra de forma iterativa los valores de las variables que reduzcan la suma de los cuadrados, a través del modelo, ecuación 1.

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^m r_i^2(\beta) \quad (1)$$

- Partiendo de una hipótesis inicial  $\beta^{(0)}$  para el mínimo, el método procede con las iteraciones, ecuación 2.

$$\beta^{(s+1)} = \beta^{(s)} - (J_r^T J_r)^{-1} J_r^T r(\beta^{(s)}) \quad (2)$$

Donde, si  $r$  y  $\beta$  son columnas de vectores, las entradas de la matriz Jacobiana es ecuación 3.

$$(J_r)_{ij} = \frac{\partial r_i(\beta^{(s)})}{\partial \beta_j} \quad (3)$$

Y el símbolo  $T$  denota la transpuesta de la matriz. Si se considera que  $m = n$ , la iteración se simplifica, ecuación 4.

$$\beta^{(s+1)} = \beta^{(s)} - (J_r)^{-1} r(\beta^{(s)}) \quad (4)$$

El cuál es una generalización directa del método de Newton en una dimensión

### Detector de bordes Canny

El algoritmo de detección de bordes *Canny* [14] propone un método de localización de bordes de acuerdo a dos criterios para bordes arbitrarios. Estos

criterios son denominados “*Signal-to-noise ratio*” (SRN) y *localization*. Un paso crucial para el algoritmo es capturar ambos criterios intuitivos de forma matemática. En la ecuación 5 se representa el modelo de SRN como primer criterio de localización.

$$SNR = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} (G - x) f(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^{+w} f^2(x) dx}} \quad (5)$$

Con este criterio, se localizan los bordes de los objetos con la presencia de ruido utilizando como operador de respuesta la  $f(x)$ . De manera consecutiva, se emplea el segundo criterio de localización (*localization*) de bordes que es representado con la ecuación 6.

$$Localization = \frac{\left| \int_{-w}^{+w} G'(-x) f'(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^{+w} f^2(x) dx}} \quad (6)$$

En síntesis, el modelo general se basa en un criterio de especificación y localización matemática, usando una optimización numérica para encontrar los operadores óptimos de los bordes inferiores y superiores de la imagen, por lo que, excluye los pixeles encontrados dentro y fuera de los bordes, permitiendo definir la forma geométrica del conjunto de objetos en la imagen.

### Umbral Otsu

Por su parte, el algoritmo de detección automática de umbral Otsu [15] es un algoritmo que realiza una evaluación sobre la factibilidad de un umbral en base a las condiciones de intensidad luminosa que presenta una imagen; es decir, analiza de manera estadística cada imagen de entrada (en niveles de gris) y retorna de manera automática el valor de umbral óptimo para una imagen. En la formulación de este algoritmo, dada la representación de pixeles de una imagen, representada en  $L$  niveles de grises  $[1, 2, \dots, L]$ . El número de pixeles  $i$  es denotado por  $n_i$  y el número total de pixeles por  $N = n_1 + n_2 + \dots + n_L$ . El histograma de distribución de grises es normalizado y relacionado como una distribución probabilística, ver ecuación 7.

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad P_i \geq 0, \sum_{i=1}^L P_i = 1 \quad (7)$$

Para evaluar la “efectividad” de un umbral, se utilizan las siguientes medidas de separación de clases, representada en las ecuaciones 8, 9, 10 y 11.

$$\sigma_B^2 = w_0(\mu_0 - \mu_T)^2 + w_1(\mu_1 - \mu_T)^2 \quad (8)$$

$$\sigma_B^2 = w_0 w_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (9)$$

$$\sigma_w^2 + \sigma_B^2 = \sigma_T^2 \quad (10)$$

$$\sigma_B^2(K^*) = \max \sigma_B^2(k) \quad (11)$$

Donde  $K$  es el nivel de umbral óptimo a/ maximizar ecuación 11;  $\sigma_B^2$  la función del nivel de umbral; por último,  $\mu$  y  $w$  las probabilidades de ocurrencia de las clases.

Se asume entonces, que el valor de  $K$  es el nivel de gris adecuado para la imagen que se procesa.

### Algoritmo de detección de bordes CannySu

Entonces, el algoritmo CannySu consiste básicamente en analizar la imagen dada como entrada, con el algoritmo Otsu para calcular el valor de umbral que de acuerdo a su histograma, sea el adecuado para una mejor separabilidad de clases. Este valor de umbral, es proporcionado por las ecuaciones de la 7 a 11, modificando el operador de respuesta  $f(x)$  de la ecuación 5 del detector Canny. De tal forma que la localización en los bordes de las imágenes, incluso en presencia de ruido, sea realizado de una manera adecuada.

### 3. Experimentación

La metodología seguida para la evaluación del algoritmo de SR y CannySu se realizó como lo muestra el diagrama de bloques de la figura 1:

- Se obtiene una imagen con la que se desea trabajar.
- Se evalúa si la imagen está en escala de grises; de ser válida entrará directamente al proceso de SR y detección de bordes, en caso contrario, se

transformará la imagen a escala de grises para luego ser procesada por el sistema.

- Sobre la imagen validada, se emplea el algoritmo de SR para mejorar sus características.
- Posteriormente, esta imagen es analizada con el algoritmo CannySu.
- Finalmente, se obtiene como salida una imagen con bordes mejor definidos.

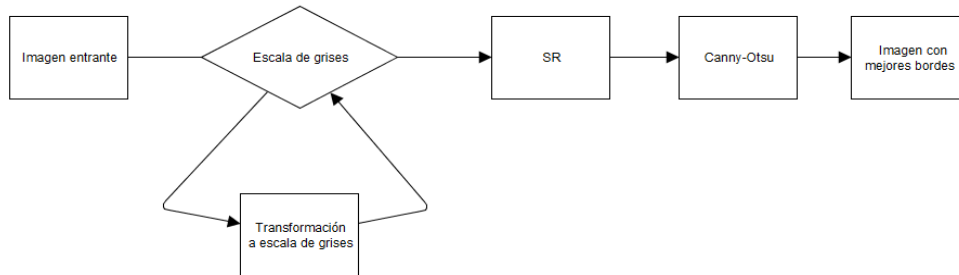


Figura 1 Diagrama de bloques de la experimentación.

El banco de datos analizado [16] se tomó del *National Center for Biotechnology Information*. Para el trabajo, se consideraron 121 imágenes de resonancia magnética, tomadas de manera consecutiva. Proviene del tórax de un paciente con molestias en el interior debido, posiblemente, a un cuerpo extraño. Las imágenes tienen un tamaño de 320x320 píxeles, en niveles de gris de 16 bits. Estas imágenes tienen la modalidad de imagen MRI; Magnetic Resonance Image, y para su uso fueron transformadas a JPG.

El objetivo de la primera prueba fue evaluar el preprocesamiento realizado con el algoritmo de SR. Un ejemplo de este experimento es el siguiente: se utilizó la imagen de la tomografía mostrada en la figura 2. La transformación a escala de grises no fue necesaria. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de SR para mejorar la calidad de las texturas utilizando las 4 imágenes que le siguen en la tomografía (figura 3). En la imagen resultante se aprecia una mejora evidente en contraste con las imágenes tomadas como base (figura 4).

El objetivo del segundo caso de experimentación es mostrar la variabilidad de intensidad que tienen las imágenes consideradas, a pesar de saber sido adquiridas de manera continua. En este caso sólo se realizó la detección del



umbral con el algoritmo de Otsu, para determinar el mejor valor de umbral para cada imagen de la figura 3. La tabla 1 expone dichos valores.

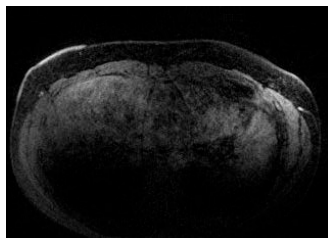


Figura 2 Parte lateral del tórax, imagen original en escala de grises.

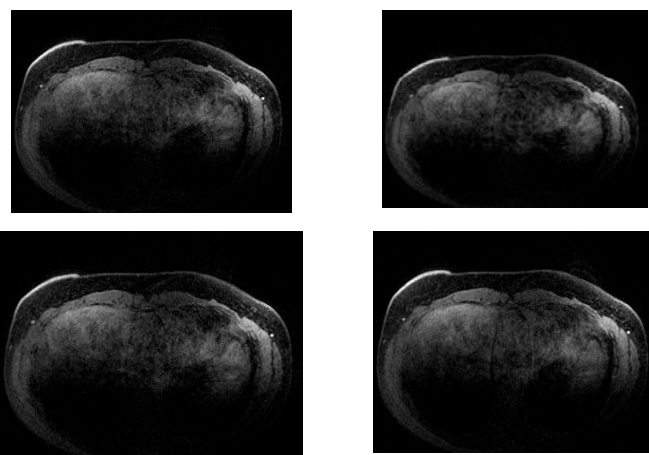


Figura 3 Secuencia de Imágenes utilizadas para el algoritmo de SR.

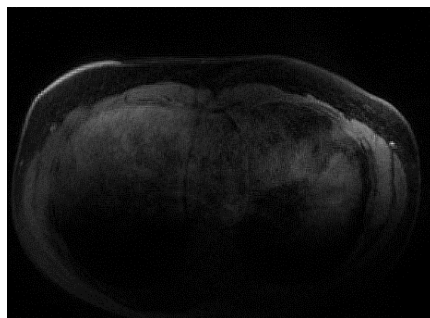


Figura 4 Imagen resultante de la aplicación de SR.

Tabla 1 Valor del nivel de umbral Otsu para las imágenes mostradas en la figura 3.

Imagen	Nivel de umbral Otsu
1	27
2	45
3	32
4	32

Finalmente, el objetivo de la tercera prueba se realizó con la aplicación del algoritmo Canny + Otsu + SR, al que denominamos *COSR*. La figura 5 muestra los resultados obtenidos de este trabajo y su comparación con el algoritmo Canny tradicional.

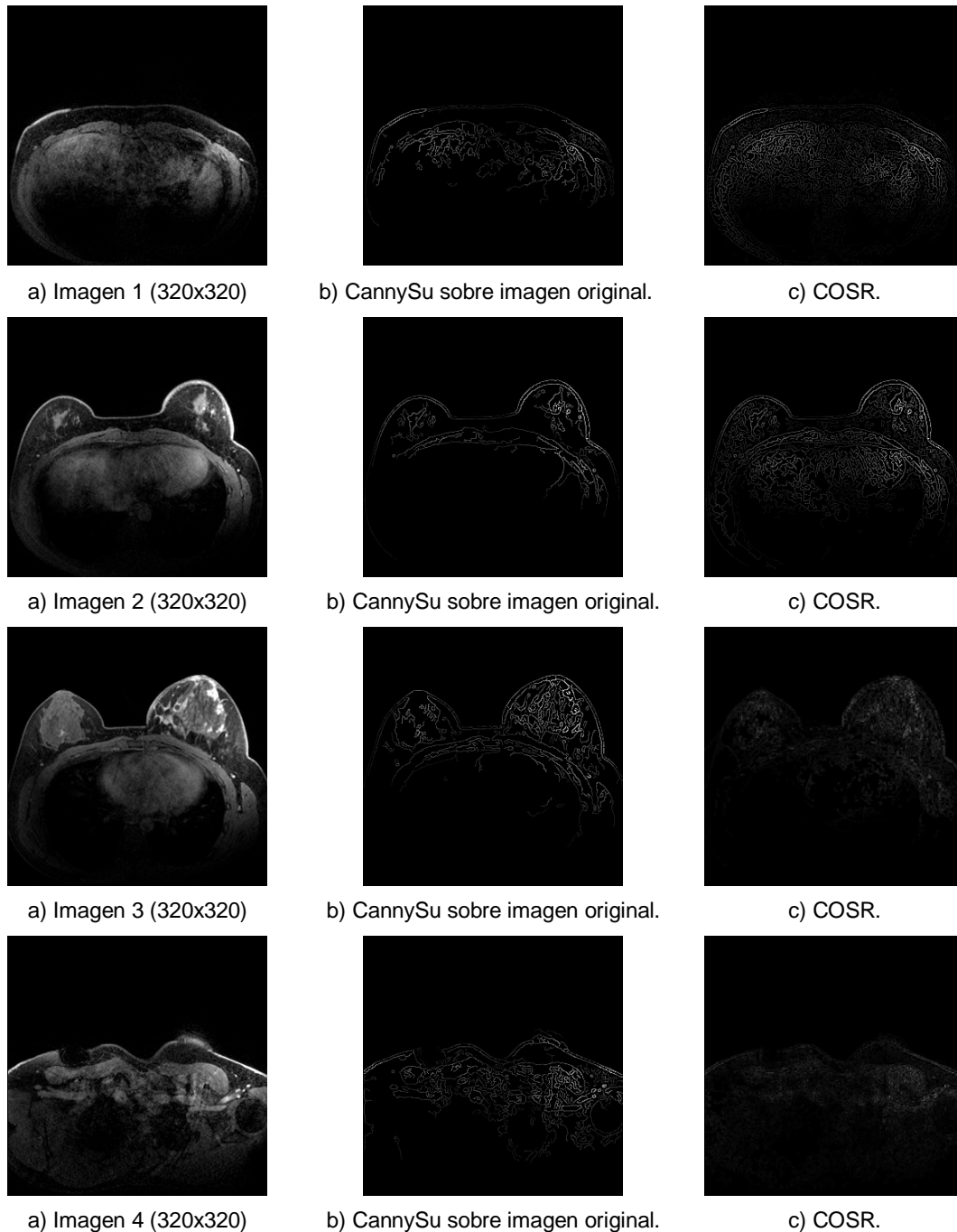


Figura 5 Resultados de la aplicación el algoritmo CannySu y COSR.

En las imágenes resultantes (sección c, de la figura 5) se puede apreciar un mayor detalle en los bordes detectados al combinar técnicas de SR y el algoritmo CannySu, en contraste con las imágenes que fueron procesadas con su resolución original y el algoritmo de detección de bordes propuesto. Hay que apreciar que el algoritmo de **COSR** al determinar el nivel de umbral, para cada imagen en función de su intensidad, detecta una mayor cantidad de detalle en la misma y por ello representa una interesante alternativa al algoritmo de Canny tradicional.

#### **4. Discusión**

La SR es una herramienta muy valiosa para aumentar los detalles de una imagen cuya resolución no sea muy buena debido a la calidad del dispositivo de origen con la que fue capturada. Eliminando los problemas de la baja resolución que comprometerían la extracción de información para aplicaciones de uso tal como lo es la detección de bordes. En este trabajo, se utilizó la técnica de SR Gauss-Newton en conjunto con un algoritmo de detección de bordes Canny al que se le proporcionó un valor de umbral, obtenido con Otsu, para la detección de los bordes. La mejora de imágenes con SR y detección del umbral óptimo permite tener una mejor definición de las regiones de interés en la imagen. Sin embargo, se detectaron ciertos inconvenientes al momento de hacer las pruebas con la técnica de SR de Gauss-Newton, ya que como solucionador lineal tiene limitaciones con la modificación de imágenes que no estén reconstruyendo una secuencia en 3D. Además, mostró ser poco efectivo para aumentar la resolución en imágenes con cierto nivel de borrosidad, entre otro tipo de ruidos. Una técnica más robusta de SR aumentaría de manera favorable los resultados de los bordes detectados con la aproximación propuesta del método COSR. Como trabajo futuro, se propone desarrollar un algoritmo de SR que soporte mayor variedad de imágenes y tolerancia a otros tipos de ruido. Con respecto al algoritmo de detección de bordes CannySu, es una buena alternativa para determinar los niveles necesarios de umbral de una imagen, cuyos bordes sean necesarios de extrapolar a la mejor visualización posible.

## 5. Conclusiones

Un método para mejorar la detección de bordes de imágenes médicas en escalas en grises ha sido propuesto para solucionar ciertos problemas de ruido. El método propuesto está caracterizado por utilizar un algoritmo de SR para mejorar la calidad de las imágenes y posteriormente emplear el algoritmo de detección de bordes CannySu que, establece el mejor nivel de umbral para la detección de bordes con la combinación de los algoritmos Canny y Otsu. Los resultados fueron satisfactorios al momento de ofrecer más bordes y con mejor definición en las imágenes; después de hacer las pruebas con SR y sin SR, se encontró que la aplicación de dicha técnica permite tener imágenes de mejor resolución, que facilitan la detección de bordes. Finalmente, COSR (Canny + Otsu + SR), probó ser una buena combinación para mejorar la detección de bordes en imágenes médicas. Este método es simple de implementar y eficiente.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] E. Carmi, S. Liu, N. Alon, A. Fiat, D. Fiat, "Resolution enhancement in MRI". *Magn. Reson. Imaging*. Vol. 24. No. 2. 2006. Pp. 133–154.
- [2] A. Papoulis, "Generalized sampling expansion". *IEEE Trans. Circuits Syst*. Vol. 24. No. 11. 1977. Pp. 652–654.
- [3] M. Irani, S. Peleg, "Motion Analysis for Image Enhancement: Resolution, Occlusion, and Transparency". *J. Vis. Commun. Image Represent*. Vol. 4. 1993. Pp. 324–335.
- [4] S. Farsiu, D. Robinson, M. Elad, P. Milanfar, "Fast and Robust Multi-Frame Super-Resolution". *IEEE Trans. Image Process*. Vol. 13. No. 10. 2004. Pp. 1327–1344.
- [5] D. Mitzel, T. Pock, T. Schoenemann, D. Cremers, "Video super resolution using duality based tv-l 1 optical flow". *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. Vol. 5748 LNCS. 2009. Pp. 432–441.

- [6] A. V. Bhavsar, A. N. Rajagopalan, "Range map superresolution-inpainting, and reconstruction from sparse data". *Comput. Vis. Image Underst.* Vol. 116. No. 4. 2012. Pp. 572–591.
- [7] K. Nguyen, C. Fookes, S. Sridharan, S. Denman, "Feature-domain super-resolution for iris recognition". *Comput. Vis. Image Underst.* Vol. 117. No. 10. 2013. Pp. 1526–1535.
- [8] M. V. W. Zibetti, F. S. V Bazán, J. Mayer, "Determining the regularization parameters for super-resolution problems". *Signal Processing.* Vol. 88. No. 12. 2008. Pp. 2890–2901.
- [9] R. Biswas, J. Sil, "An Improved Canny Edge Detection Algorithm Based on Type-2 Fuzzy Sets". *Procedia Technol.* Vol. 4. 2012. Pp. 820–824.
- [10] H. Di, D. Gao, "Gray-level transformation and Canny edge detection for 3D seismic discontinuity enhancement". *Comput. Geosci.* Vol. 72. 2014. Pp. 192–200.
- [11] E. Sen Li, S. L. Zhu, B. S. Zhu, Y. Zhao, C. G. Xia, L. H. Song, "An adaptive edge-detection method based on the Canny operator". *Proc. - 2009 Int. Conf. Environ. Sci. Inf. Appl. Technol. ESIAT 2009.* Vol. 1. No. 3. 2009. Pp. 465–469.
- [12] M. A. Ingle, G. R. Talmale, "Respiratory Mask Selection and Leakage Detection System Based on Canny Edge Detection Operator". *Procedia Comput. Sci.* Vol. 78. 2016. Pp. 323–329.
- [13] M. Hanief, M. F. Wani, "Modeling and prediction of surface roughness for running-in wear using Gauss-Newton algorithm and ANN". *Appl. Surf. Sci.* Vol. 357. 2015. Pp. 1573–1577.
- [14] J. Canny, "A computational approach to edge detection". *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 8. No. 6. 1986. Pp. 679–698.
- [15] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms". *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* Vol. 9. No. 1. 1979. Pp. 62–66.
- [16] National Center for Biotechnology Information. <https://imaging.nci.nih.gov/ncia/login.jsf>. Mayo 2016.

## **7. Autores**

Jaime Sacramento Pérez Gutiérrez es estudiante del posgrado de maestría en Ciencias de la Computación del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Áreas de interés: visión por computadora, sistemas embebidos, reconocimiento de patrones.

Dra. Andrea Magadán Salazar es Doctora en Tecnologías de la Información y Sistemas Informáticos, por la Universidad Rey Juan Carlos, España, 2016. Áreas de interés: súper- resolución, tratamiento digital de imágenes, inspección visual automatizada, reconocimiento de patrones.

Dr. Raúl Pinto Elías es Doctor en Ciencias, con estudios realizados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav). Octubre de 2000. Áreas de interés: visión artificial, procesamiento de imágenes, visión robótica, reconocimiento de patrones.

Dr. Manuel Mejía Lavalle es Doctor en Ciencias Computacionales con especialidad en Inteligencia Artificial, por el ITESM campus Cuernavaca. Áreas de interés: Redes neuronales, reconocimiento de patrones, procesamiento de imágenes.

# DESIGN AND IMPLEMENTATION ON A FPGA OF A FACIAL RECOGNITION SYSTEM USING “EIGEN FACES”

***Sergio Barrios del Villar***

Universidad de Guadalajara, Departamento de Electrónica, CUCEI  
*sergio.barrios@alumnos.udg.mx*

***Juan José Raygoza Panduro***

Universidad de Guadalajara, Departamento de Electrónica, CUCEI  
*juan.raygoza@cucei.udg.mx*

***Alejandra Salamanca Chavarín***

Universidad de Guadalajara, Departamento de Electrónica, CUCEI  
*salecita\_ale@hotmail.com*

***Edwin Christian Becerra Álvarez***

Universidad de Guadalajara, Departamento de Electrónica, CUCEI  
*edwinbecerra@gmail.com*

***Susana Ortega Cisneros***

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N., CINVESTAV, Unidad Guadalajara  
*susana.ortega@gdl.cinvestav.mx*

## **Abstract**

Automated Facial recognition is a very complex problem due to the many factors that affect the way an image of a person's face looks. Most of these have no relation to the actual identity of the person. The algorithms used to solve this issue can take advantage of a high level of parallelism and the applications require real time processing. For these reasons, an implementation on hardware is very convenient. In this article, such implementation is presented using a Xilinx Virtex 6 FPGA using one of the most common algorithms, called Eigen Faces.

**Index Terms:** Eigen Faces, facial recognition, FPGA, PCA.

## **1. Introduction**

The problem with facial recognition consists in the following: Given the image of a face and a database of known individuals, the system must determine the identity of the person. It has been seen [1] that even babies from 1 to 3 days of age are able to distinguish between known faces; however, the exact method in which the human brain performs this task is unknown. Automated facial recognition consists of extracting significant characteristics from the image of a face, changing it to a useful way of representation, and classifying it as belonging to a person. This procedure is very useful, since other authentication systems depend on the individual performing a task such as remembering a password, carrying an object (key, token), or in the case of biometric systems placing a finger on or an eye in front of a special purpose sensor. On the other hand, facial recognition can be done passively with cameras, which have a low cost in comparison with other sensors, and without the individual being aware of the process.

Successful facial recognition is quite complex, since the faces of several people can be similar with only subtle differences. In addition, a human face is a flexible object; it changes with age, expression, and the use of objects such as glasses and cosmetics. The way an image of a face is perceived changes due to the position of the observer and the illumination of the environment. Most facial recognition systems work properly under ideal circumstances, the system presented in [2] achieved better results than humans. But their performance falls significantly in an environment where the factors that affect the variability of faces are not controlled.

## **2. Classification of facial recognition methods**

Jafri and Arabnia [3] categorize facial recognition methods in the following manner.

### **Based on Geometric Characteristics**

These methods consist of first processing the input image in order to identify and measure distinctive facial characteristics such as the eyes, mouth, nose, and



other features. Then, they calculate geometric relations between these points (for example the distance between the eyes), reducing the image to a vector of geometric characteristics. Finally, they use standard pattern detection techniques to identify the face in the database that shares those features. Since the points are extracted before analysis, these kinds of methodologies are robust with respect to position changes. The greatest disadvantage of these methods is the difficulty of automatically extracting the facial characteristics. Leung, Chang and Yu Li [4] implemented a design which performs the extraction step on a FPGA and communicates the results to a Personal Computer for the recognition process.

### **Statistical**

Consider that an image of a face is represented as a two dimensional matrix with light intensity values. Then, a simple facial recognition method is to perform the correlation operation between the input image and the images in the database. This approach is computationally expensive and sensitive to variations in position, illumination, noise, and a cluttered background. These problems arise due to performing classification on a highly dimensional space. A better performance can be achieved by using statistical techniques to represent images in a space with a smaller dimensionality.

### **AI (Artificial Intelligence)**

AI methodologies use tools such as neural networks and Machine Learning techniques to perform the classification. These are often combined with Statistical methods to reduce dimensionality before performing the actual recognition process due to their computational complexity. The solution proposed by Mahale in [5] used this approach.

## **3. Statistical tools: PCA**

Principal Component Analysis (PCA) is one of the most widely used statistical methods for efficiently representing images of faces. It takes advantage of the fact that any face can be represented economically in the coordinate space of the

Eigen Pictures and that any face can be reconstructed partially by using a small collection of Eigen pictures and the corresponding projections, or coefficients, along each one. Using this methodology, Eigen faces can be constructed that correspond to the Eigen Vectors associated with the Eigen values of the covariance matrix of the known faces. It is possible to recognize a face by comparing the projections along the Eigen faces with the projections of the images in the database. The Eigen faces define a characteristic space, drastically reducing the dimensionality of the original space, and the identification of the face is performed in this new space. This system is robust with respect to illumination changes, but its performance decays with changes in size. This technique is used in [6] to detect facial expressions.

The multiple observer technique consists of having a database not only with an image of a known face, but also with several images of it from different angles. PCA performs properly with a single image per person but fails with more, since the change of an image due to position and illumination is bigger than the change caused by the identity of the person. This causes PCA to consider unwanted variations. This problem can be solved by using Fisher's Linear Discriminant Analysis (LDA), which maximizes the variation between classes and between images of the same class. This method, called Fisher Faces, is better at handling simultaneous changes in light and expression. With small collections of training images, PCA can outperform LDA, according to [7].

Another approach uses difference images. These are defined as the subtraction between the intensity values of corresponding pixels from two images. Two classes of difference images are proposed: Intrapersonal, the difference between images of the same person, and extra personal, the difference between images of different persons. It is assumed that difference images originate from discrete Gaussian distributions from the space of all the difference images. The probability that a difference image belongs to the interpersonal class can be calculated using the Bayes' theorem. If the probability of a difference image being of the interpersonal class is higher than the probability of it being of the extra personal class, then it is considered that the two images from which the difference image was calculated

belong to the same person. Thus, the problem of facial recognition is reduced from a classification of grade  $m$  ( $m$  being the number of people in the database) to a binary classification problem.

#### 4. Eigen faces algorithm

Facial recognition consists of two stages: preparing a set of images of known individuals and, given an input face, recognizing if it belongs to one of the known individuals. The advantages of this algorithm are explored in [8], [9] and [10] by implementing it on MATLAB. The steps using the Eigen Faces algorithm to prepare the images are the following:

A database  $S$  is gathered using  $M$  images with the faces of known persons (1). An average image is obtained by calculating the average of the intensity values of each pixel in the set of images (2).

$$S = \{I_1, I_2, I_3, \dots, I_M\} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M I_n \quad (2)$$

A new set of images (4) is gathered, using new images with the distinctive characteristics of each, by subtracting the average image (3).

$$I_n = I_n - P \quad (3)$$

$$A = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_M\} \quad (4)$$

A covariance matrix is obtained (5) using the set of images and is transposed. The resulting matrix is symmetrical, which is useful for calculating the Eigen vectors  $u_k$  and Eigen values  $\lambda_k$ , defined as complying with the relationship in (6).

$$C = AA^T \quad (5)$$

$$\lambda_k = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M (u_k^T J_n)^2 \quad (6)$$

Finally, the weights  $v_{ik}$  are calculated using (7). These represent the projections of the images over the Eigen Faces space.

$$u_l = \sum_{k=1}^M v_{lk} J_k \quad l = 1, \dots, M \quad (7)$$

Now that the faces are represented in the Eigen vector space, it is possible to classify an input image. Eigen vectors are sometimes called Eigen faces in this application, because they resemble faces when interpreted as images. First, the weights of the input image over the new space are obtained similarly to how the weights of the images in the database were processed. First, the mean image is subtracted and the result is multiplied by the Eigen faces (8). The vector with the weights is called  $\Omega$  (9).

$$w_k = u_k^T (I - P) \quad (8)$$

$$\Omega^T = [w_1, w_2, \dots, w_M] \quad (9)$$

The vector  $\Omega$ , which represents the input image over the Eigen faces space, can be compared to the vectors with the projections of the images in the database. One way of doing this is by subtracting the vector of the input from each vector of the database. The result will have a small magnitude (or Euclidean distance) if the images come from the same face. The Euclidean distance is defined as the square root of the sum of the square power of each weight (10), but since it is only important to compare how big it is and not the exact magnitude, then it is possible to use the square power of the Euclidean distance, thus avoiding the need to calculate the square root; instead, the calculation becomes a dot product between the vector and itself (11).

$$\|p\| = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2} \quad (10)$$

$$\|p\|^2 = p \cdot p \quad (11)$$

## 5. Implementation on FPGA

The FPGA used was the Xilinx Virtex-6 model VC6VCX240T. Values calculated on MATLAB are declared as constants in VHDL, so they synthesize as connections to VCC or ground. The image is stored in a special distributed Random Access Memory (RAM) made for matrices, which receives two addresses, one for the

position of the pixel in the x axis and one for the y axis. This memory is also different because it outputs all the contents of the memory in parallel, so it can be processed in parallel as well, figure 1.

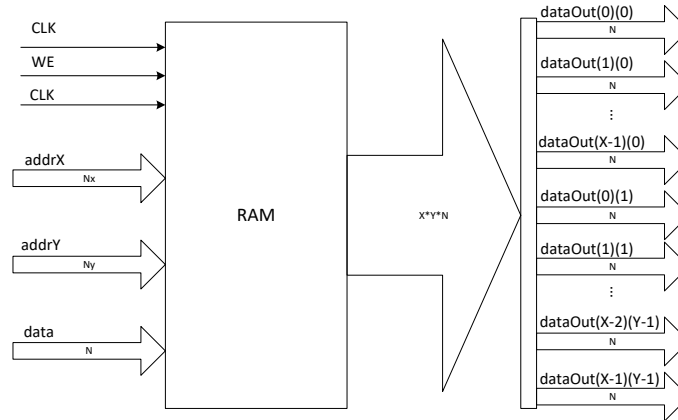


Figure 1 Distributed RAM Memory.

The first step in facial recognition is to subtract the mean image from the input image; this is done via subtraction modules. These are instantiated once per pixel, as seen in figure 2.

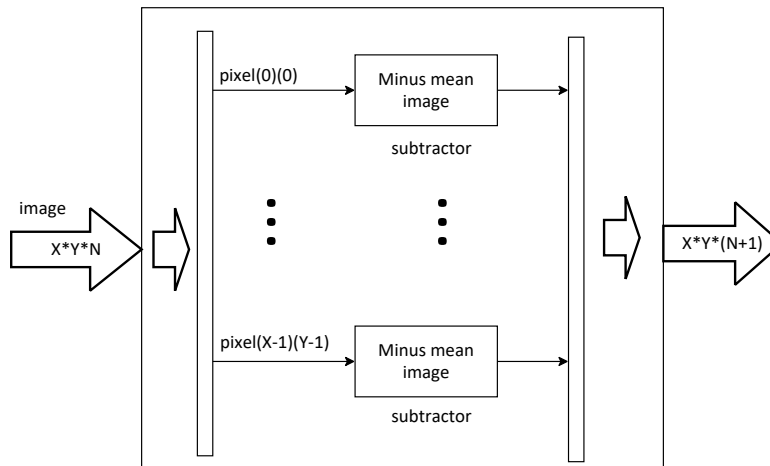


Figure 2 Mean image subtraction module.

The second step is to perform a dot product of the resulting image by each of the Eigen Faces. The dot product block consists of a pixel by pixel parallel multiplication followed by the sequential sum of the results, as seen in figure 3.

One dot product module is used for each Eigen Face (figure 4). For a very small database, there is one for each image in the database. After the dot product, the result is a representation of the image in the new space.

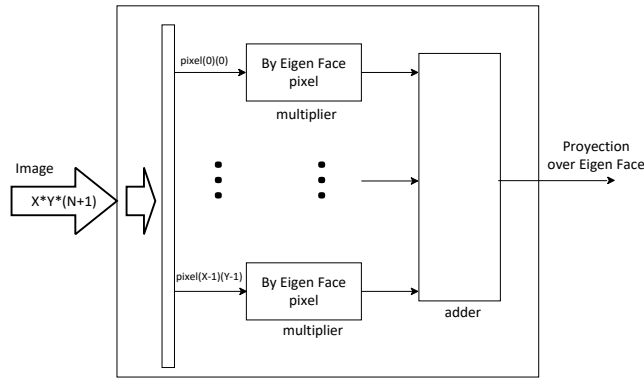


Figure 3. Dot product module.

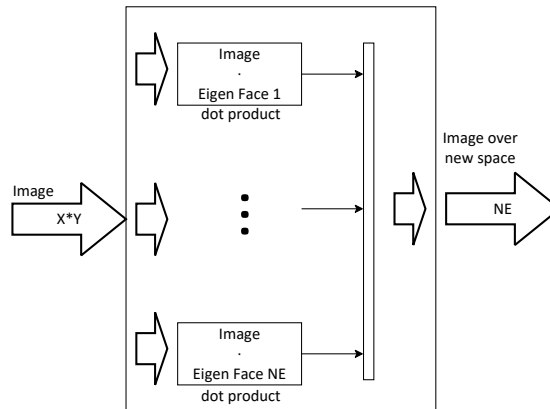


Figure 4 Module to obtain the new representation.

The last phase is to compare it with the representation of the images of the database. These modules are implemented once for every image in the database. The first step of the comparison is to subtract the weights of the image in the database from the weights of the input image, as seen in figure 5.

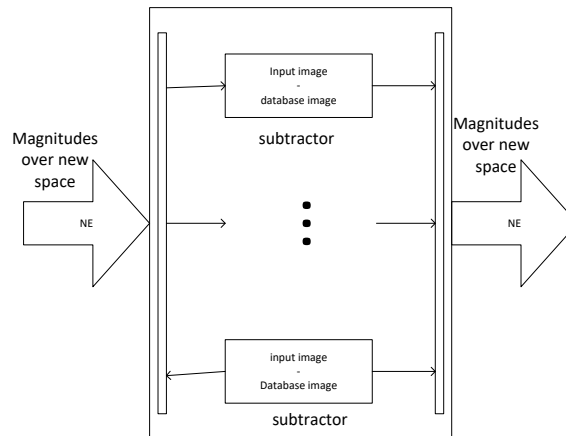


Figure 5 Module to subtract the weights.

The result indicates how different the input face is from that in the database. A value proportional to the magnitude of this vector is obtained using a dot product module (figure 3) with a bigger word length but a much smaller number of elements—one per eigen face instead of one per pixel. As mentioned in the previous section, the dot product operation is performed between the vector and itself. It is important to avoid overflow errors by expanding the word length at each step.

## 6. Results

Two experiments were used to verify that the system works correctly and to test if the amount of elements needed to synthesize the system are feasible. The first experiment is a trivial case. It has images of 2 by 2 pixels and a word length of 8 bits. The database has only two images. This experiment allows the results to be easily verified, since synthesizing or calculating the result does not require much time. An image with only 4 pixels cannot represent a face, but the method works well with other patterns. The images in the database can be seen in figure 6, the mean image appears in figure 7, and figure 8 shows an image outside the database to verify that the system recognizes it as unknown.



Figure 6 Image database for experiment one.



Figure 7 Mean image for experiment one.

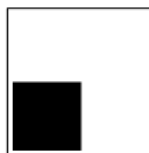


Figure 8 Image external to the database in experiment one.

The Eigen vectors can also be interpreted as images and hold the distinctive characteristics of the images in the database. In this case, the Eigen pictures resemble the images in the database minus the mean image, since all the images in the database are completely different. Figure 9 shows these images. The utilization of Look-Up Tables (LUT) and Input Output Blocks (IOB) in the FPGA (Virtex 6) for this experiment is shown in table 1.

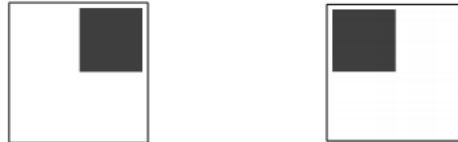


Figure 9 Eigen pictures of experiment one.

Table 1 FPGA utilization for experiment one.

Slice Logic Utilization	Used	Available	Utilization
Number of Slice LUTs	277	150,720	1%
Number of bonded IOBs	15	400	3%

The second experiment is more useful, since it has images of 32 by 32 pixels and a word length of 8 bits. Images of this size, although small, are capable of representing faces, and since face recognition systems are mainly about reducing the dimensionality, it is better to start with images with lower resolution (and therefore lower dimensionality) to begin with. A word length of 8 bits is also a common standard for grayscale images, which are preferred, since color has little information about the identity of a person.

The images used for this experiment are drawings of faces, guaranteeing that all of them will have the same position, expression, and illumination. These were taken from [11]. Since these are the ideal conditions, the system is able to correctly classify the known faces shown in figure 10.

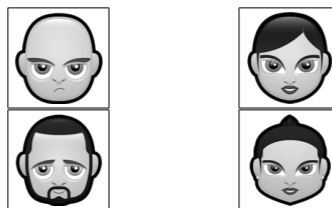


Figure 10 Image database for experiment two.



The mean image appears in figure 11. As with the previous experiment, another image outside the database was used to verify that it is not recognized as any of the known faces. This is shown in figure 12.



Figure 11 Mean image for experiment two.

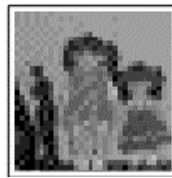


Figure 12 Image external to the database in experiment two.

This time, the Eigen faces represent the principal components of the faces in the databases; these can be seen in figure 13.



Figure 13 Eigen faces of experiment two.

The amount of components needed to synthesize the system increases greatly with the size of the image. The 32 by 32 images used result in a system small enough to fit in the proposed Virtex 6, and their size is adequate for practical face recognition uses. However, a larger image will require a bigger FPGA. The exact utilization percentages can be seen in table 2.

Table 2. FPGA utilization for experiment two.

<b>Slice Logic Utilization</b>	<b>Used</b>	<b>Available</b>	<b>Utilization</b>
Number of Slice LUTs	104,093	150,720	69%
Number of bonded IOBs	25	400	6%

## 7. Conclusion

An FPGA implementation is very useful for facial recognition, especially if real time processing is a requirement, because many computations can be performed in parallel. In order to take advantage of the parallelism, it is necessary for all the values of the pixels in the input image to be available at the same time. This can be a problem, since an image of 32 by 32 pixels with 8 bit intensity levels has 8192 bit values, which far exceeds the amount of input output blocks available. However, the implemented distributed RAM solves this issue and allows for larger sizes without requiring a large amount of IOBs, since the pixel values are loaded one at a time, while the reading is done all at once, so the processing begins while the image is still loading.

The system produced the desired result in the ideal conditions tested in the aforementioned experiments. In order to use this in a real life project, it is necessary to load images into the system in gray scale and a fixed size, so a program or an additional hardware module would be required to read images from a camera or another input device and convert it to the required format with the face centered. Such systems are presented by Gorde (2016) [12] and Kim (2015) [13]. The proposed work uses only 72% of the resources needed by Kim's work but it includes the preprocessing stage.

## 8. Bibliography and References

- [1] C. Turati, V. Macchi, F.S. Cassia, I. Leo, "Newborns face recognition: Role of inner and outer facial features". *Child Development*. Vol. 77. No. 2. 2006. Pp. 297–311.
- [2] C. Lu, X. Tang, "Surpassing Human-Level Face Verification Performance on LFW with GaussianFace". In arXiv, Cornell University. 16 Jun 2014.

- [3] R. Jafri, H. Arabnia, "A Survey of Face Recognition Techniques". *Journal of Information Processing Systems*. Vol. 5. No. 2. June 2009.
- [4] H. Leung, L. Cheng, X. Yu Li, "A FPGA implementation of facial feature extraction". *Journal of Real-Time Image Processing*. Vol. 10. 2015. Pp. 135-149.
- [5] G. Mahale, H. Mahale, A. Goel, S. K. Nandy, S. Bhattacharya, R. Narayan, "Hardware Solution for Real-Time Face Recognition". 28th International Conference on VLSI Design, Bangalore. 2015. Pp. 81-86.
- [6] S. Agrawal, P. Khatri, "Facial Expression Detection Techniques: Based on Viola and Jones Algorithm and Principal Component Analysis". Fifth International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies, Haryana. 2015. Pp. 108-112.
- [7] A. Martinez, A. Kak, "PCA versus LDA". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 23. No.2. 2011. Pp. 228-233.
- [8] P. Singh, A. Sharma, "Face Recognition Using Principal Component Analysis in MATLAB". *International Journal of Scientific Research in Computer Science and Engineering*. Vol. 3. Issue 1. 28 February 2015.
- [9] M. J. Pemeena, K. Murugesan, S. R. Inabathini, G. K. Rajini, Dinesh, A. Kumar, "Recognizing the 2D Face Using Eigen Faces By PCA". *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. Vol. 82. No. 1. 10 December 2015.
- [10] R. S. Negi, R. Garg, "Face Recognition Using Hausdroff Distance as a Matching Algorithm". *International Journal of Scientific Research*. Vol. 4. Issue 9. September 2015.
- [11] Hopstarter, "Face Avatars Icons". August 2011. via IconArchive, Creative Commons Attribution.
- [12] H. Kim, M. Lee, Y. Baek, S. Kim, B. Koo, J. Lee, "Fully Hardwired Illumination Invariant Face Recognition Engine and FPGA Implementation". 2015 IEEE International Symposium on Consumer Electronics. January 2015.

- [13] S. H. Gorde, M. Kumar. P. Balramudu, "An FPGA based Face Recognition System using Gabor and Local Binary Pattern". *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering*. Vol. 5. Issue 1. January 2016.

# **BLOQUES DE ADAPTACIÓN ANALÓGICOS BASADOS EN LMS DE SIGNO**

***Edgar López Delgadillo***

Universidad Autónoma de Aguascalientes  
*elopezd@correo.uaa.mx*

***Luis Alejandro Flores Oropeza***

Universidad Autónoma de Aguascalientes  
*lflores@correo.uaa.mx*

***Alejandro Díaz Méndez***

Universidad Autónoma de Aguascalientes  
*ajdiaz@inaoep.mx*

## **Resumen**

En años recientes los sistemas adaptivos se han convertido en un tema importante para distintas aplicaciones. En particular, los sistemas adaptivos analógicos son importantes cuando se requiere una razón de convergencia rápida o cuando las señales procesadas tienen un ancho de banda amplio. En este artículo se presenta la implementación de un sistema adaptivo analógico basado en el criterio LMS de signo y considerando un tamaño de paso variable. El desempeño del sistema propuesto se demuestra mediante simulaciones usando modelos en VerilogA y a nivel transistor en tecnología CMOS.

**Palabra(s) Clave(s):** Filtro adaptivo, paso variable, SS-LMS.

## **1. Introducción**

En años recientes los sistemas adaptivos analógicos se han convertido en un tema importante de investigación para su aplicación en diversas áreas tales como comunicaciones, sistemas de audio, control entre otras. Aunado a esto, en aplicaciones “on chip” las variaciones de proceso, temperatura y voltaje pueden

resultar en un mal funcionamiento de los circuitos. Para solucionar este problema se han implementado diversas técnicas adaptivas dentro del circuito integrado de tal manera que las variaciones mencionadas no afecten al sistema.

En aplicaciones comunes los sistemas adaptables se implementan generalmente en el dominio digital debido a que las operaciones matemáticas que requieren son fácilmente implementadas de esta manera. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales el ancho de banda de las señales que se procesan y las velocidades de convergencia requeridas son tan altas que los sistemas adaptables digitales tradicionales resultan de poca utilidad. En este caso se pueden implementar las técnicas adaptivas analógicas para solucionar los problemas mencionados.

Tanto en el dominio analógico como en el digital, una de las técnicas más utilizadas para adaptar los sistemas, en particular filtros, es el criterio LMS (Least Mean Squares). Esto debido a su simplicidad matemática comparado con otras técnicas como RLS (Recursive Least Squares). Desafortunadamente a pesar de la simplicidad de LMS, cuando se implementa en aplicaciones dentro de chip puede ocupar grandes cantidades de área debido a la necesidad de operaciones de multiplicación e integración en su implementación.

Debido a las razones expuestas anteriormente existe la necesidad de proponer estructuras adaptivas analógicas con un número reducido de elementos de circuito y con una velocidad de convergencia alta para aplicaciones en circuitos integrados CMOS.

En [1] y [3] se presentan los desarrollos más representativos en lo referente a los filtros adaptivos analógicos incluyendo sus ventajas y desventajas. En ambos casos se presenta la formulación matemática y diagramas de bloques pero no se llega a una implementación concreta. En [2] se analiza el desempeño en DC de cuatro filtros adaptables analógicos, incluyendo entre ellos las realizaciones con signo del criterio LMS. En [5] se propone la implementación de un filtro analógico LMS en una tecnología CMOS estándar. Para este último una de las principales características es la gran cantidad de área en silicio que requiere. En [6,7] presentamos una solución que requiere una menor área de silicio, a diferencia de implementaciones anteriores.

## 2. Filtros Adaptivos Analógicos

En la figura 1 se presenta la estructura general de un filtro adaptivo analógico. Este sistema tiene dos bloques principales, el primero es el filtro adaptable que se caracteriza por la posibilidad de programar algunos de sus parámetros. El segundo bloque corresponde al criterio de adaptación el cual se usa para modificar los parámetros del filtro. Las entradas al sistema son: la señal a ser filtrada  $x(t)$  la señal deseada  $d(t)$ . Las salidas son la señal de error  $e(t)$  y la filtrada  $y(t)$ . El objetivo del sistema es adaptar los parámetros de tal manera que el error sea lo más pequeño posible.

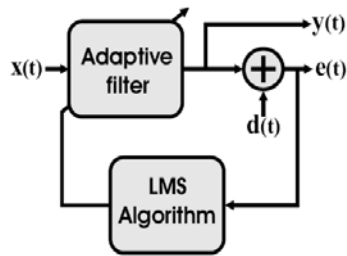


Figura 1 Estructura general de un filtro adaptivo analógico.

Una de las realizaciones de filtros adaptables más utilizadas es la transversal. Sus principales ventajas son la simplicidad, la estabilidad y la disponibilidad de algoritmos para adaptar sus parámetros. En particular, una estructura de este tipo de filtros se presenta en la figura 2, [1,3], la cual está integrada por la conexión en cascada de funciones  $G_i(S)$  las cuales típicamente se implementan mediante estructuras de Laguerre o Gamma. La salida  $y(t)$  del sistema es la combinación lineal de las señales  $X_i$ , mientras que los pesos  $A_i$  pueden ser establecidos dinámicamente de manera que se tenga una señal de error lo más pequeña posible.

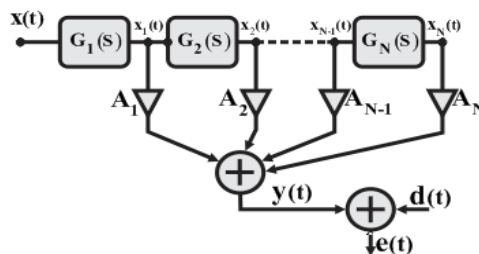


Figura 2 Estructura transversal de un filtro adaptivo analógico.

El algoritmo LMS ha sido ampliamente utilizado en filtrado adaptivo, en particular en estructuras transversales, debido a su simplicidad comparado con otras técnicas. La expresión en tiempo continuo para la adaptación con este criterio se muestra en la ecuación 1. Esta se obtiene de su contraparte en tiempo discreto haciendo una aproximación a cero del tiempo de muestreo.

$$A_i(t) = -2\mu \int_{-\infty}^t e(u) \nabla_{A_i} (e(u)) du \quad (1)$$

A partir de la ecuación 1 se obtiene el diagrama a bloques de una de las etapas de adaptación del tipo LMS en tiempo continuo tal como se muestra en figura 3. Como se aprecia, se requiere al menos un integrador, un multiplicador y una etapa de ganancia para cada uno de los pesos  $A_i$  del filtro. En consecuencia, a mayor tamaño del filtro transversal, mayor es el número de elementos de circuito analógico necesarios para adaptarlo.

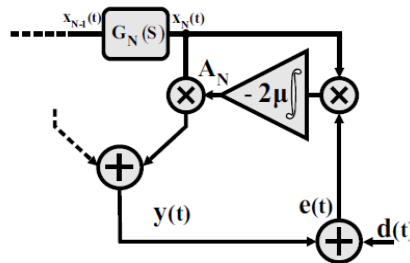


Figura 3 Estructura LMS analógica.

Una alternativa que reduce el número de operaciones y por ende el número de elementos de circuito del LMS es el SS-LMS (Sign-Sign LMS). En este sistema solo se consideran los signos del error y del gradiente del error tal como se muestra en ecuación 2.

$$A_i(t) = -2\mu \int_{-\infty}^t \text{sgn}(e(u)) \text{sgn}(\nabla_{A_i} (e(u))) du \quad (2)$$

En la ecuación 2, debido al uso de las funciones signo, la multiplicación resulta en una operación trivial de dos niveles lógicos que se puede realizar mediante una compuerta XOR. En consecuencia la integración también es una operación trivial.



La desventaja de un algoritmo basado en signo es que tiene un exceso de MSE mayor al del criterio LMS tradicional. Aún más, su proceso de convergencia es más lento. A pesar de esto se puede establecer un buen compromiso entre velocidad y precisión en términos de la constante  $\mu$ . Finalmente las condiciones de estabilidad para este tipo de filtros se establecen en [7] y [8].

### **3. Filtro SS-LMS propuesto**

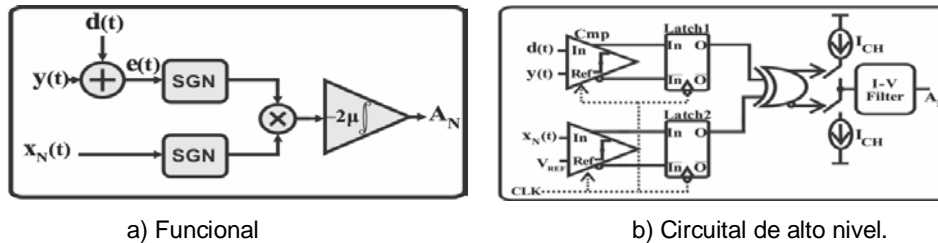
La metodología de diseño que se ha considerado para el desarrollo de este trabajo es llamada "Top-Down" y es utilizada en el diseño de circuitos integrados para asegurar el funcionamiento correcto de bloques de circuito y para establecer condiciones de diseño para éstos en tecnología CMOS. Los pasos de la metodología son los siguientes:

1. Definición funcional de estructuras de alto nivel.
2. Definición de circuitos de alto nivel (funcionamiento general de bloques de circuito).
3. Diseño a nivel transistor de cada bloque de circuitos en una tecnología CMOS estándar.
4. Desarrollo de los patrones geométricos (Layout) para cada bloque de circuitos diseñado.
5. Fabricación del circuito integrado.

Después de cada uno de los pasos anteriores existe una etapa de pruebas y validación. Para los pasos 1 al 4, estas pruebas se realizan mediante simulaciones, por lo que los materiales son los programas de simulación. Por otro lado, el paso 5 se valida con la implementación física del circuito integrado diseñado, en consecuencia los materiales son el equipo de laboratorio de electrónica y el prototipo de circuito integrado. Es importante mencionar que para el presente artículo se consideran resultados y pruebas de los puntos 1 al 3.

Una de las estructuras adaptables que se desarrollan se basa en la ecuación 2. Los modelos para los puntos uno y dos de la metodología se muestran en la figura 4. Las funciones signo se implementan mediante comparadores

temporizados y la integración es realizada por una bomba de carga y un filtro, mientras que la multiplicación de los signos se realiza mediante una compuerta XOR.



a) Funcional

b) Circuitual de alto nivel.

Figura 4 Modelos del sistema de adaptación.

Otra de las estructuras adaptables desarrolladas es la que se muestra en la figura 5. Esta es similar a la presentada en la figura 4b, solo se agrega una estructura basada en elementos similares a los del circuito original. Dicha estructura funciona como un comparador de ventana y tiene por objetivo permitir un paso variable en el tiempo de adaptación, de manera que esta sea rápida y precisa al mismo tiempo.

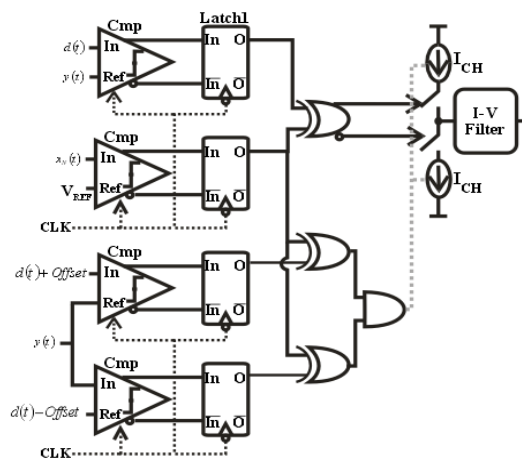
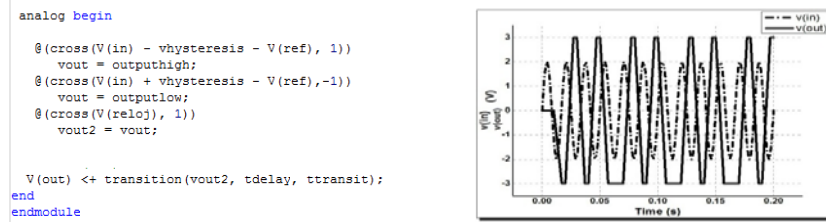


Figura 5 Modelo del sistema de adaptación con tamaño de paso variable.

Los modelos funcionales y circuitales de alto nivel de la figuras 4 y 5 se implementan con la ayuda del lenguaje de descripción VerilogA (Verilog analógico), de manera que es posible obtener un prototipo en corto tiempo para verificar funcionalidad y condiciones de diseño.

Un ejemplo del desarrollo de modelos mediante VerilogA se muestra en la figura 6, donde se aprecia el bloque de comparación temporizada. Como se observa en la figura 5(a) el modelado es muy sencillo, sin embargo se pueden tomar en cuenta fenómenos no ideales como la histéresis, retardos, tiempos de ascenso y descenso de la señal de salida, etc.



a) Modelo (b) Resultados de simulación.  
 Figura 6 Prototipo del comparador en VerilogA.

Para el diseño a nivel transistor del bloque de adaptación se considera una tecnología CMOS 0.35um de Austria Microsystems y las simulaciones se han realizado con las herramientas de Mentor Graphics. En la figura 7 se muestran los circuitos implementados para el comparador (figura 7a), la bomba de carga (figura 7b) y el filtro (figura 7c). Cabe mencionar que los OTAS utilizados en el filtro se realizan mediante una estructura diferencial simple.

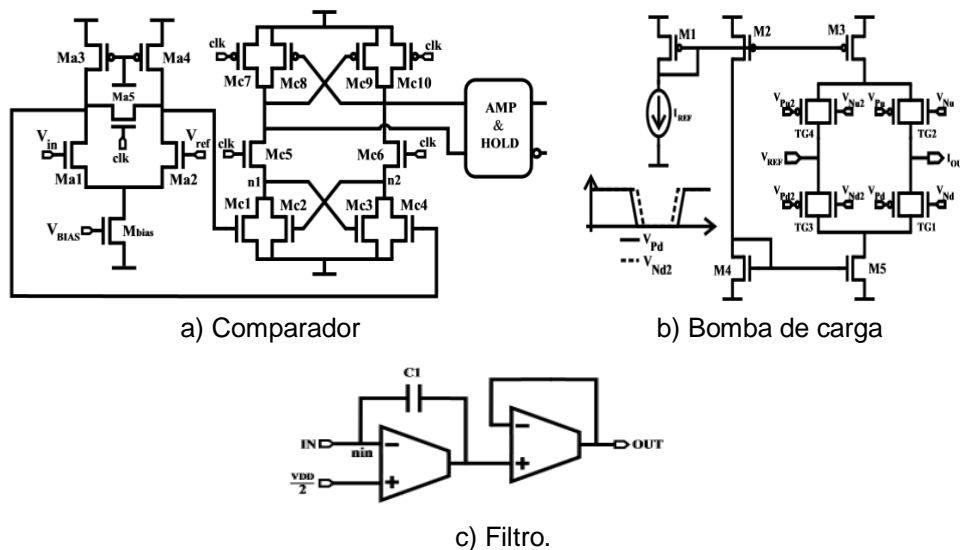


Figura 7 Diseño transistor tecnología CMOS para los bloques del sistema de adaptación.

## 4. Resultados y Discusión

Para verificar el desempeño del sistema de adaptación basado en el esquema SS-LMS se considera una señal deseada  $d(t)$  constante y una retroalimentación entre salida y entrada de manera que la salida del sistema sea capaz de adquirir el valor de la señal deseada. La métrica de desempeño utilizada es el error normalizado expresado en dB.

En la figura 8 se presentan los resultados de simulación del sistema de adaptación de la figura 4 utilizando los modelos en VerilogA para dos valores distintos de ganancia del sistema. Cabe mencionar que dicha ganancia se establece mediante el valor de la corriente de la bomba de carga y el valor del capacitor en el filtro. En la figura se aprecia la señal de salida y la de error normalizada y expresada en dB. Es claro que cuando se incrementa la ganancia se disminuye el tiempo de adaptación, sin embargo el piso de ruido se incrementa. Por este motivo es necesario mantener un compromiso entre rapidez y precisión en función de la ganancia.

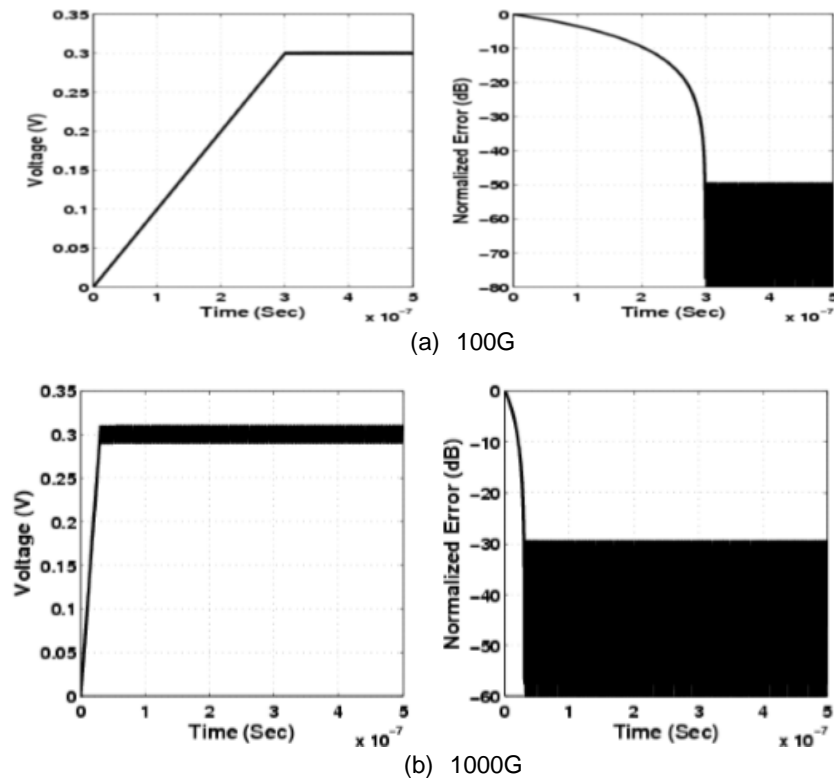


Figura 8 Resultados de simulación con modelos en VerilogA y ganancias.

En la figura 9a se muestra el comportamiento del sistema en presencia de ruido para 20 y 40 dB de relación señal a ruido (SNR). Resulta evidente que el valor del piso de ruido es proporcional a la SNR. En la figura 9b se presenta una comparación entre la estructura propuesta y un LMS convencional. Este último también es modelado en VerilogA. Aunque el desempeño de la estructura propuesta es menor que la LMS, SS-LMS presenta cantidad reducida de elementos de circuito.

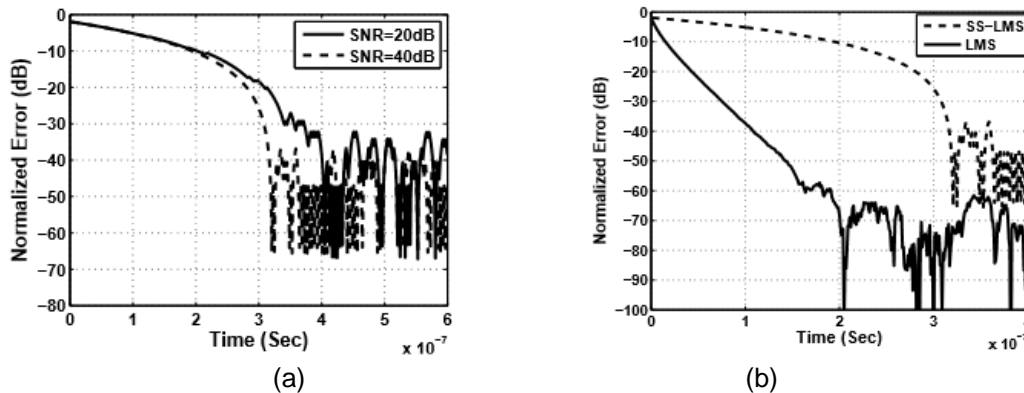


Figura 9 a) Efectos del ruido y b) Comparación LMS Vs SS-LMS.

En la figura 10 se muestran los resultados de simulación del sistema de adaptación con tamaño de paso variable. En esta se puede apreciar que el piso de ruido alcanzado es pequeño, sin embargo el tiempo de adaptación se mantiene considerablemente corto.

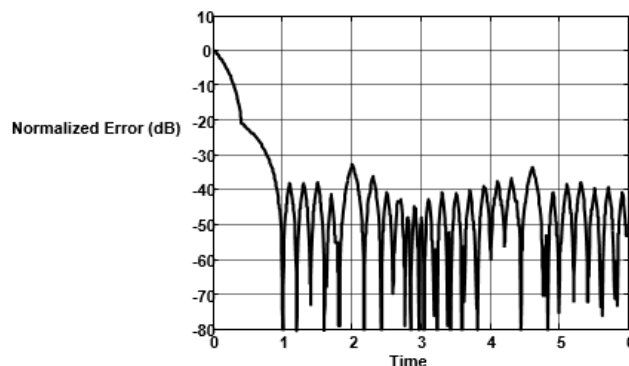


Figura 10 Simulación del sistema de adaptación con tamaño de paso variable.

Finalmente, los resultados de simulación con los circuitos CMOS se exhiben en la figura 11. Para las simulaciones se utilizan los modelos del fabricante para los

transistores MOS. En particular para los resultados presentados se utilizan los modelos de esquinas (“worst cases”). En todos los casos el piso de ruido está por debajo de -30 dB.

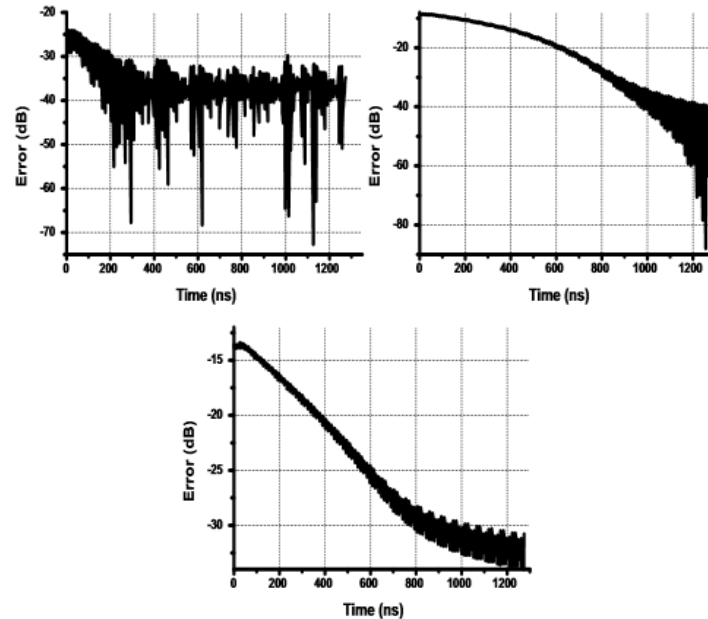


Figura 11 Resultados de simulación a nivel transistor.

## 5. Conclusiones

Se ha presentado un sistema de adaptación basado en SS-LMS. Su implementación representa una reducción de elementos de circuito comparado con el LMS. El uso de comparadores temporizados permite que la señal tratada tenga una frecuencia mayor que la del reloj del sistema. Se ha probado mediante simulaciones de alto nivel con modelos en verilog A que la magnitud del error es directamente proporcional a la ganancia del sistema.

También se ha mostrado que el tiempo de convergencia es inversamente proporcional a la ganancia del sistema. Para cada uno de los bloques del sistema se ha diseñado su circuito correspondiente en una tecnología CMOS estándar.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Carusone, D. Johns, “Analog adaptive filters: Past and present”. IEEE Proceedings Circuits, Devices and Systems. Vol. 1 No. 174. Feb. 2000. Pp. 82-90.

- [2] Shoal, "DC offset performance of four LMS adaptive algorithms". IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 1994. Pp. 409-412.
- [3] H. A Perez-Meana, "Survey of Adaptive Analog Filter". journal Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 6. No. 56. 2001
- [4] D. Johns, K. Martin, Analog Integrated Circuit Design. 1997. John Wiley and Sons, Inc.
- [5] Muer, CMOS Fractional-N Synthesizers. 2003. Kluwer Academics Publishers.
- [6] J. A. Díaz-Méndez, M. A. García-Andrade, M. E. Magaña, F. Maloberti, 52nd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, DOI: 10.1109/MWSCAS.2009.5236143. 2-5 Aug. 2009.
- [7] E. López-Delgadillo, J. A. Díaz-Méndez, M. A. García-Andrade, "Circuits Syst Signal Process". Doi:10.1007/s00034-014-9821-6. Vol. 33. 2014. Pp. 3331.

## **7. Autores**

Edgar López Delgadillo. Graduado de Ingeniería en Electrónica y Sistemas de Comunicación Digital por la Universidad Autónoma de Aguascalientes en 2002. Obtuvo los grados de Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en 2004 y 2010 respectivamente. Actualmente es profesor investigador titular adscrito al Centro de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus principales áreas de interés son el diseño de circuitos integrados analógicos y en modo mixto y los sistemas adaptables digitales y analógicos.

Luis Alejandro Flores Oropeza nació en Aguascalientes, México en 1976, obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico por parte del Instituto Tecnológico de Aguascalientes y el grado de Doctor en Ingeniería Electrónica por la Universidad Politécnica de Madrid en España en 1999 y 2005 respectivamente. Actualmente es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Sus intereses se centran en el estudio de las fuentes de alimentación conmutadas, corrección del factor de potencia y control.

# USER-CENTERED DESIGN IN MOODLE REDESIGN FOR MOBILE USE

***Beatriz A. González Beltrán***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*bgonzalez@azc.uam.mx*

***Lizbeth Gallardo López***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*glizbeth@azc.uam.mx*

***Alejandro Reyes Ortíz***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jaro@azc.uam.mx*

***Araceli Granados García***

Universidad Nacional Autónoma de México  
*aragranadosg@comunidad.unam.mx*

## Abstract

This article addresses the issue of improving user experience while redesigning Moodle for mobile use. We propose to use UCD for redesign along with usability guidelines, visual design and mobile web best practices. Students were asked to participate in a questionnaire aimed to gather their experience as a Moodle user. Questionnaire results allows us to validate the relevance of Moodle redesign for mobile devices. We conducted a usability test. Usability testing revealed that desktop version of Moodle present several problems related to visual design, accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency. We propose to document the concrete design criteria, navigation map, and specifications for the mobile version of Moodle. These documents allowed the programmer to implement Moodle for mobile use. Our finding is that using UCD



along with usability guidelines, visual design and mobile web practices we can improve user experience.

**Palabra(s) Clave(s):** Mobile application, Moodle, User-centered design.

## 1. Introduction

User-centered design (UCD) is a software design methodology where designers and users collaborate actively throughout the software development process. Users drive the design and are the key to determine the usability of a product (e.g. application or web site). User-centered design methodology is divided into four phases that operate iteratively: analysis, design, construction and evaluation. Analysis is the initial phase where the users context is studied. Design is where user requirements are transformed into design proposals. Construction phase involves the building of the application that meets users requirements. Evaluation phase has as a primary function to ensure that the system developed meets user needs [1].

UCD has been used to design user-friendly Web systems. According to Nielsen [2] usability “addresses the Web and determine the success or failure of a site”. A usable web site means that it is useful, easy to use, easy to understand, easy to learn and easy to appreciate.

Accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency are **usability guidelines** that support the construction of usable Web sites. Accessibility refers to the possibility for users to easily find and access information. Accessibility is also related to the downloading time, so in the design is important to take into account Internet connection speeds from which users connect. Information architecture is the organization of Web site content, so the user can get the information he wants with the fewest steps. Lynch and Horton [3] suggest to organize the site in such a form that will not be more than three steps to reach information and that menus do not include more than seven links to the different sections of the site. Navigation allows the user to move from one page to another within a website. A clear and consistent navigation helps to maintain user orientation within the site and reduces search times (Lynch and Horton [3], p. 30).

Simplicity and consistency involves the use of clear graphics, simple and well related to the action to be performed, so that the user can easily interact with the site. In addition, consistency in design also involves maintaining visual consistency and organizational throughout the entire site, which helps the user to become familiar with the site, to feel comfortable and confident that he will find what he wants.

Moreover, **visual design elements** such as grid, color, typography and graphics are the basic building blocks of visual composition; therefore, they support the construction of usable Web sites [2]. A grid is not visible element in the web design that helps to align text and page images to give visual balance and order. The consistency of a design generated from a grid facilitates navigation and understanding of the information presented. Grids helps to give visual order and hierarchy to the information displayed on the screen [3].

In addition to the basic elements of visual design, the W3C group has proposed **general recommendations for building web sites or web applications** to display properly on mobile devices [4].

UCD has mainly been applied for the design of new products. However, UCD has successfully been employed to improve the redesign of an existing product [5]. This work is about the redesign of Moodle for mobile use. Moodle, an acronym from Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment, is one of the most used learning platforms worldwide. Moodle has different modules to manage a course, e.g. calendar, participants, forums, blogs, wikis, chat and tasks [6]. In this redesign we apply UCD along with usability guidelines, visual composition and mobile web best practices.

We have found several projects that propose a mobile version of a learning management system. Those projects can be classified into open-source and proprietary. Some open-source systems are: Mobile Learning Engine Moodle (MLE Moodle) [7], ATutor [8] with a mobile theme, and Moodle Mobile [9]. Some proprietary systems are: BSCW [10] and Blackboard [11]. We have not found information that would allow us to know if they have applied UCD for their proposals; but we performed an analysis of their interfaces.

ATutor, Moodle Mobile, BSCW and Blackboard employ one-column and two-column pages; however, MLE Moodle only uses one-column pages, making navigation and organization difficult. BSCW, Blackboard, and Moodle Mobile display a back button to return to previous page; but there is not a navigation bar to allow the user to know where he is located. Finally, only MLE Moodle and BSCW display a home button to easy access other sections.

## **2. Development (method)**

### **Participants**

We conducted a UCD study with students at the Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco campus. 137 students enrolled in Moodle courses took part in the study. These students were selected randomly from 1404 Moodle students. Participants are smartphones users.

### **Materials**

Students were asked to participate in a questionnaire aimed to gather their experience as a Moodle user. In particular, the aspects we collect from the survey were aimed at understanding students' perception about Moodle, if Moodle is a convenient tool to support courses, if Moodle is easy to use, if its design is attractive, student working environment, file formats commonly used, information consulted in their courses, activities most frequently performed in their courses, and their disposition to use a mobile device to access Moodle.

In order to find out usability problems in the desktop version of Moodle, we access to the "Taller de diseño" course from a smartphone.

### **Procedure**

When participants accepted the invitation to take part in this study, they were given a URL to answer the questionnaire. They completed the questionnaire in their own time and working environment.

Questionnaires allows us to gather user context. To complete the analysis, we performed a usability test to the desktop version of Moodle. Usability testing seek

to find out problems related to visual design, accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency.

In the design phase, we proposed a set of concrete design criteria, navigation map, and specifications for the mobile version of Moodle. This proposal took into account usability guidelines, visual design as well as mobile web best practices.

In the construction phase, a programmer implemented the mobile version of Moodle according to the documents constructed in the design phase. The programming language was PHP and was implemented as an extension of the desktop version.

Finally, in the evaluation phase, the programmer runs performance tests.

### 3. Results

#### Analysis phase

##### Users context

Questionnaire results indicate that 69% of students accessed Moodle from school, 86% agree that Moodle supports classroom education, 91% would like to access Moodle from a mobile device and 63% use their mobile device to access Moodle daily or 2 or 3 times a week (table 1).

Table 1 Moodle usage.

Rate	Observed variable
69 %	Access Moodle from school
86 %	Consider that Moodle supports classroom education
82 %	Consider that Moodle provides information of interest
73 %	Can easily contact classmates in Moodle
74 %	Like to use Moodle
91 %	Consult assessments and exercises in Moodle
76 %	Look up learning resources in Moodle

The questionnaire allows us to validate that Moodle redesign for mobile devices is relevant since most of the students believe that Moodle is an application that supports classroom education and would like to access from a mobile device.

## Usability testing

Usability testing revealed that desktop version of Moodle present several problems related to visual design, accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency as it is shown in figure 1, when accessing the home page.



Figure 1 Desktop version of Moodle, using a smartphone.

We can observe in figure 1 that there are very few elements that can be seen, forcing the user to use the vertical and horizontal scroll bars. We highlighted that UAM logo, visitor status and navigation breadcrumbs were always present on the pages. Moreover, wine and gray colors predominate as they are part of the institutional colors. Table 2 summarizes Moodle usability test.

Table 2 Moodle usability test.

Guideline	Analysis
Accessibility	Difficulty to find information.
Information architecture	Just a part of the content is seen, user is forced to use vertical and horizontal bars
Navigation	Logo, visitor status and navigation breadcrumbs are always present on the pages
Simplicity and consistency	<b>Color:</b> institutional colors are used consistently. <b>Typography:</b> Font type Verdana and Arial are used for readability on screen. <b>Graphics:</b> Not all graphic elements are linked to the action to be performed.

## Design phase

In this part, we present the concrete design criteria, navigation map, and specifications for the mobile version of Moodle. This proposal considered usability guidelines, visual design as well as mobile web best practices.

### *Concrete design criteria*

To solve usability problems revealed in usability testing, we proposed a set of concrete design criteria for the mobile version of Moodle (table 3).

Table 3 Design criteria for the mobile version of Moodle.

Guideline	Design criteria
Accessibility	Concise text with three screens maximum.
Information architecture	Three levels to reach a Moodle element.
Navigation	Breadcrumbs at the top of each screen and a secondary navigation bar, icon based.
Simplicity and consistency	Grids with one, two or three columns and a variable number of rows. Different colors to distinguish each category and item. Graphics up 20 kb

## Navigation map

We proposed a navigation map (figure 2). Note that no more than three steps are used to reach a course element. Navigation starts at AULA VIRTUAL home page, where access is permitted to users. First level corresponds to the academic divisions (CBI, CSH, CyAD and Posgrado CyAD). Second level corresponds to the course (TEMAS SELECTOS 5, SEMINARIO DE DISEÑO, and TALLER DE DISEÑO). Third level corresponds to activities or resources (e.g. assignments, participants, calendar).

## Specifications

We proposed a set of specifications about layout, graphics size, typography and color for each page type for the mobile version of Moodle. figure 3 shows the specifications for the home page (named “Aula Virtual” in navigation map), figure 4 shows the specifications for the course page, figure 5 shows the specifications for

the one-column pages, and finally figure 6 shows the specifications for the two-columns pages.

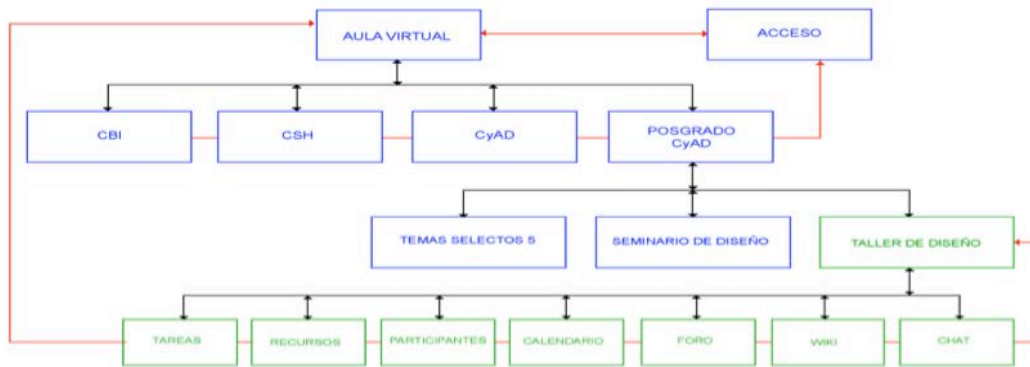


Figure 2 Navigation map for the mobile version of Moodle.

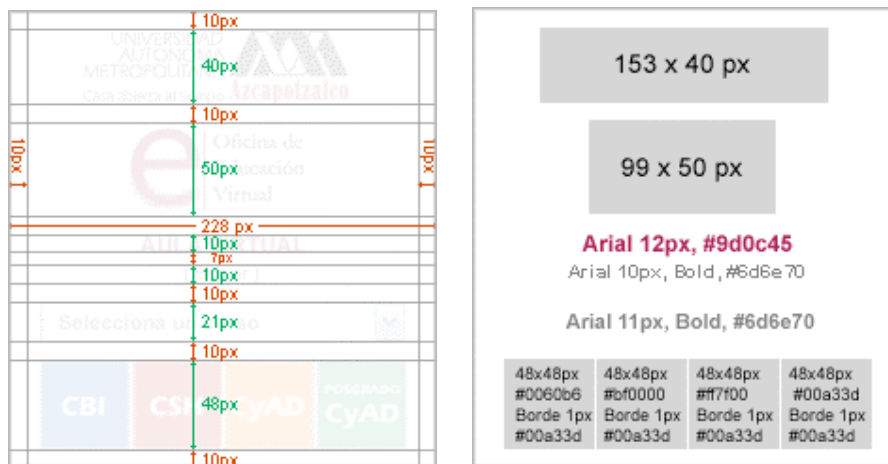


Figure 3 Specifications for the login page of the mobile version of Moodle.

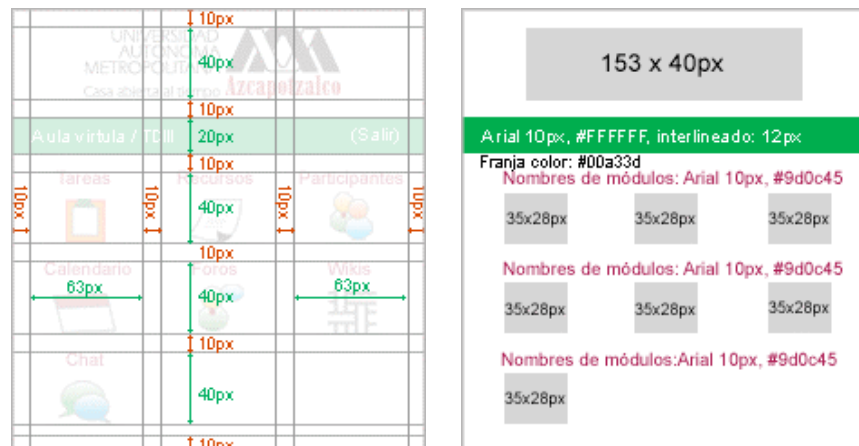


Figure 4 Specifications for the course page of the mobile version of Moodle.

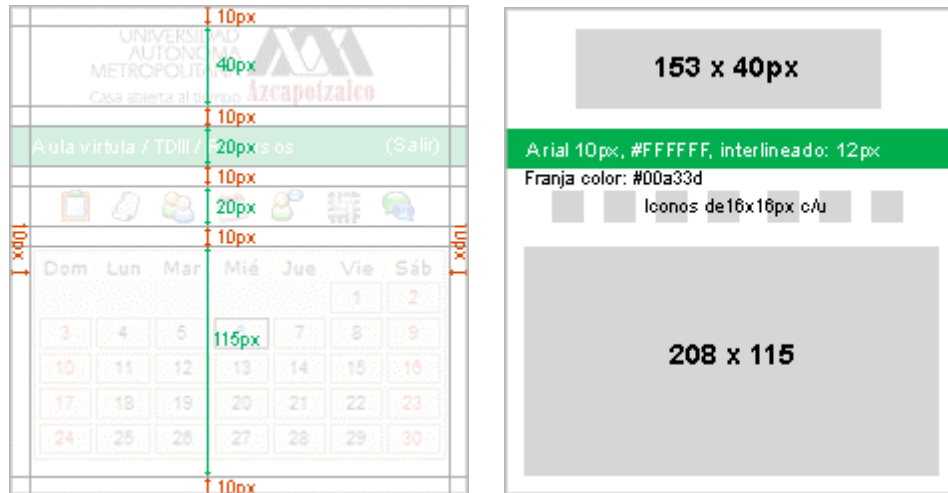


Figure 5 Specifications for the one-column page of the mobile version of Moodle.

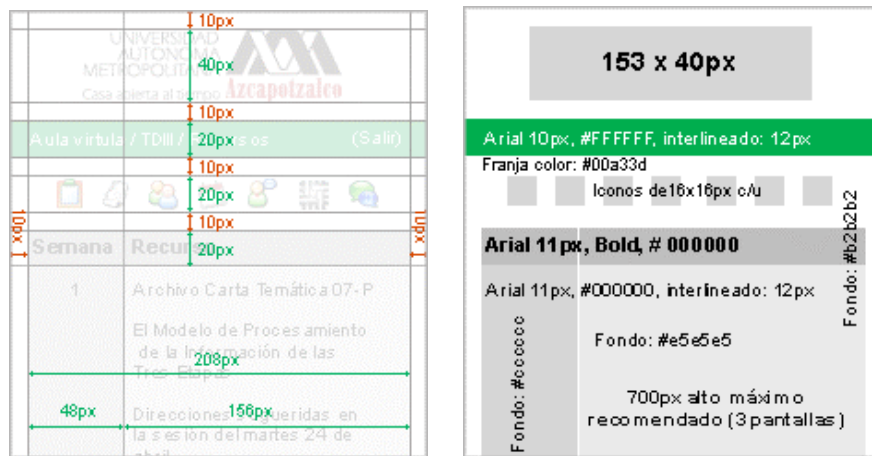


Figure 6 Specifications for the two-columns page of the mobile version of Moodle.

## Construction and evaluation phases

In this part, we present the mobile version of Moodle as seen from a smartphone. figure 7a presents the home page. Figure 7b shows an example of the course page. Figure 8a presents an example of a one-column page. Finally, figure 8b shows an example of a two-column page.



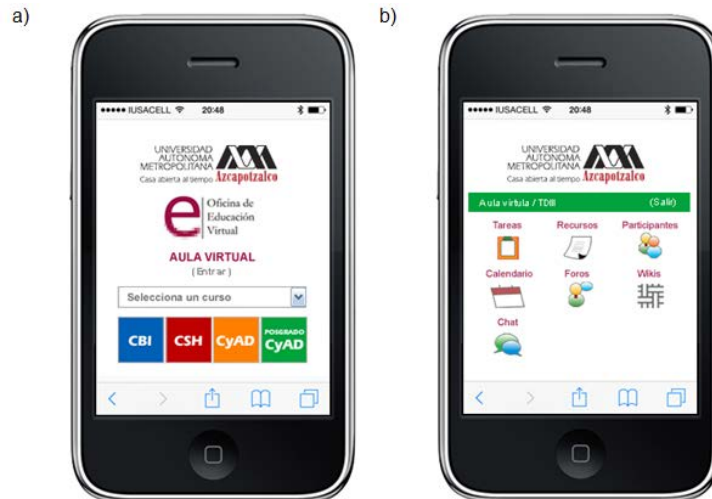


Figure 7 a) Login page and b) A course page of the mobile version of Moodle.



Figure 8 a) One-column and b) two-columns page example (mobile version of Moodle).

We can observe in figure 7a that each academic division is assigned a color. Figure 7b, 8a and 8b have a text-based navigation bar based on the so-called breadcrumbs, which help the user to be location-aware and to navigate through the course-tree. The color of the navigation bar depends on the division in which the user is located. Figure 8a and 8b have an icon-based navigation bar for each of the active modules to easily change between activities and resources. In the evaluation phase we run performance tests of the electronic prototype of the mobile version of Moodle.

## **4. Discussion**

Usability guidelines, visual design and mobile web application web practices has already been used to design a web page. More specifically, Nielsen [2] provides usability guidelines for accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency that support the construction of usable web sites. Visual design elements such as grid, color, typography has been considered by Lynch and Horton [3] to support the construction of usable web sites. Moreover, there exist a W3C recommendation for mobile web best practices [4].

However, UCD has been applied essentially for design of new products. We have applied a UCD for Moodle redesign for mobile use taking into account visual design, usability guidelines and mobile web best practices.

In the analysis phase we conducted a questionnaire for Moodle users. The results of the questionnaire allowed us to validate the relevance of Moodle redesign for mobile devices. Moreover, we performed a usability test that revealed that desktop version of Moodle presents several problems related to visual design, accessibility, information architecture, navigation, simplicity and consistency.

In the design phase, we proposed concrete design criteria, navigation map, and specifications for the mobile version of Moodle. This proposal considered visual design, usability guidelines, and mobile web best practices.

In the construction phase, an electronic prototype was developed according to the documents constructed in the design phase. Finally, in the evaluation phase, we run performance tests of the electronic prototype of the mobile version of Moodle.

## **5. Conclusions**

In this paper we have applied UCD for Moodle redesign for mobile use taking into account usability guidelines, visual design, and mobile web best practices to foster usability.

As the case study was successful, we recommend that the method proposed in this paper guides new web application redesigns for mobile use.

Authors 1, 2 and 4 gratefully acknowledge the Universidad Autónoma Metropolitana. Authors thank Kitzia Abarca Alonso for programming the electronic prototype.

## 6. Bibliography and References

- [1] A. Williams. "User-centered Design, Activity-centered Design, and Goal-directed Design: A Review of Three Methods for Designing Web Application". In Proceedings of the 27<sup>th</sup> ACM International Conference on Design of Communication (SIGDOC'09). Pp. 1-8.
- [2] J. Nielsen, *Designing Web Usability: The Practice of Simplicity*. 1999. New Riders Publishing, Thousand Oaks, CA, USA.
- [3] P. J. Lynch and S. Horton, *Web Style Guide 3<sup>rd</sup> edition: Basic Design Principles for Creating Web Sites*, Third edition. 2009. Yale University Press, New Haven, CT, USA.
- [4] W3C. *Mobile Web Best Practices 1.0*. <http://www.w3.org/TR/mobile-bp/>. June 2016.
- [5] R. Jones, "Contextual Methods for the Redesign of Existing Software Products". 2007. *International Journal of Human-Computer Interaction*. Volume 22. Issue 1-2. Pp. 81-101.
- [6] Moodle. Moodle – Open-source learning platform. <http://moodle.org>. June 2016.
- [7] MLE Moodle. MLE – Mobile Learning Engine. <http://mle.sourceforge.net>. August 2016.
- [8] ATutor. ATutor Learning Management System. <http://atutor.ca>. August 2016.
- [9] Moodle Mobile. Moodle Mobile – MoodleDocs. [http://docs.moodle.org/31/en/Moodle\\_Mobile](http://docs.moodle.org/31/en/Moodle_Mobile). August 2016.
- [10] BSCW. Orbiteam | BSCW: Mobile Access. <http://www.bscw.de/english/mobil.html>. August 2016.
- [11] Blackboard. Mobile Learning (mlearning) Solutions | Blackboard. <http://www.blackboard.com/mobile-learning/index.aspx>. August 2016.

## **7. Autores**

Beatriz A. González Beltrán holds a PhD in Computer Science from the Institut National Polytechnique de Grenoble, France.

Lizbeth Gallardo López holds a PhD in Computer Science from the Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

Araceli Granados García holds a Master in Design from the Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico City, Mexico.

Alejandro Reyes Ortiz holds a PhD in Computer Science from the Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, Mexico.

# **AGRUPAMIENTO DE SERVICIOS WEB MEDIANTE EL ALGORITMO COLONIA ARTIFICIAL DE ABEJAS**

***Maricela Claudia Bravo Contreras***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mcbc@correo.azc.uam.mx*

***Román Anselmo Mora Gutiérrez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*rmg@correo.azc.uam.mx*

***Iván Flores Sánchez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*floressanchezivan@gmail.com*

***Roberto Alfonso Alcántara Ramírez***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*raar@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

En este artículo se reporta un enfoque híbrido para la clasificación de servicios Web basada en el algoritmo bio-inspirado de Colonia Artificial de Abejas (ABC), K-medias y un método de consenso. La clasificación se realiza mediante la utilización de medidas de similitud semántica, es decir se comparan semánticamente servicios web, obteniendo de cada métrica un valor, que es el valor de similitud de cada servicio entre todos los demás servicios, estos datos son almacenados en diferentes matrices, para su posterior calculo mediante el algoritmo híbrido y obtener una mejor clasificación de los servicios web.

**Palabra(s) Clave(s):** Agrupamiento de servicios Web, colonia artificial d abejas, métodos heurísticos.

## **1. Introducción**

El agrupamiento de servicios Web es la tarea de identificar las características de los servicios y determinar a qué clase o grupo pertenecen. La implementación de mecanismos de agrupamiento automática de servicios Web es relevante porque a través de ésta se pueden organizar de acuerdo a algún criterio seleccionado grandes colecciones de servicios en la Web. Contar con grandes colecciones de servicios organizados y agrupados es un objetivo constante de los directorios de servicios Web públicos, porque solamente a través de un directorio bien organizado se puede facilitar la automatización de la búsqueda, selección, sustitución e invocación de cualquier servicio Web.

En lo referente al agrupamiento, en los últimos años se han implementado métodos basados en analogías biológicas para resolver problemas complejos de computación y optimización entre los que destacan algoritmos genéticos, estrategias evolutivas, comportamiento de algunas especies de animales, etcétera. Muestra de ello es la creciente tendencia para construir soluciones inspiradas en la naturaleza para resolver problemas complejos y difíciles. Los seres vivos como los animales y las plantas y el mismo clima exhiben extraordinarios, complejos y fascinantes fenómenos naturales y uno de ellos es la forma de encontrar la mejor solución para resolver el problema y mantener el equilibrio perfecto entre sus componentes o el medio que los rodea.

Esta es la idea principal de la computación inspirada en la naturaleza, es decir, imitar los pasos que ha desarrollado la naturaleza y adaptarlos a un problema, convirtiéndolo así en un algoritmo bio-inspirado [1]. Son muchos los algoritmos bio-inspirados que imitan la naturaleza para resolver problemas de optimización [2].

El empleo de métodos convencionales para resolver problemas de optimización requiere enormes esfuerzos y recursos computacionales, que tienden a fallar en cuanto aumenta el tamaño del problema [3]. Esta es la razón principal de la implementación de un algoritmo que explote la característica de inteligencia colectiva, dicha característica la posee el algoritmo Colonia Artificial de Abejas como alternativa en la optimización de clasificar servicios web.

En este artículo se presenta un enfoque innovador para el agrupamiento de servicios Web que utiliza un algoritmo híbrido basado en el algoritmo de Colonia Artificial de Abejas, K-Medias y Consenso. Para la evaluación del método de agrupamiento se utilizó una colección de 1027 servicios Web públicos con los cuales se realizaron las etapas del procesamiento, clasificación, pruebas y análisis. El algoritmo recibe como entrada una colección de 8 matrices de mediciones de similitud semántica, las cuales se calculan utilizando todas las descripciones de servicios Web.

## **2. Antecedentes**

El trabajo que se reporta en este artículo forma parte de un proyecto de investigación de mayor alcance cuyo objetivo es el de diseñar e implementar un directorio semántico de servicios web y recursos de programación utilizando métodos eficientes, totalmente automatizados, que permitan la organización, composición y clasificación de servicios web con un enfoque semántico. En la figura 1 se muestra la arquitectura general del directorio semántico, el cual está compuesto por módulos cada uno con un objetivo específico, en particular, con este trabajo se contribuyó con el módulo de clasificación y agrupamiento de servicios web y para su funcionamiento hace uso de los módulos que le preceden:

- Módulo de recuperación de servicios Web. Las descripciones de servicios Web son buscados y recuperados de la red mediante el uso de programas autónomos que buscan y recuperan recursos disponibles en la Web (también conocidos como crawlers o arañas Web).
- Módulo de análisis y extracción de datos. Los servicios recuperados son procesados mediante programas que barren el archivo y extraen la información relevante de los servicios. La información específica de los servicios se almacena en varias ontologías de servicios Web.
- Módulo de cálculo de similitudes. Los datos extraídos son utilizados para realizar el cálculo de la similitud semántica utilizando ocho medidas de similitud.

- Módulo de clasificación y agrupamiento. La clasificación y agrupamiento de servicios Web se realiza utilizando diferentes algoritmos, por ejemplo: máquinas de soporte vectorial, redes neuronales, optimización por colonia de hormigas, entre otros. En particular en este artículo se reporta un método de agrupamiento de servicios mediante un algoritmo híbrido derivado del algoritmo Colonia Artificial de Abejas (ABC).

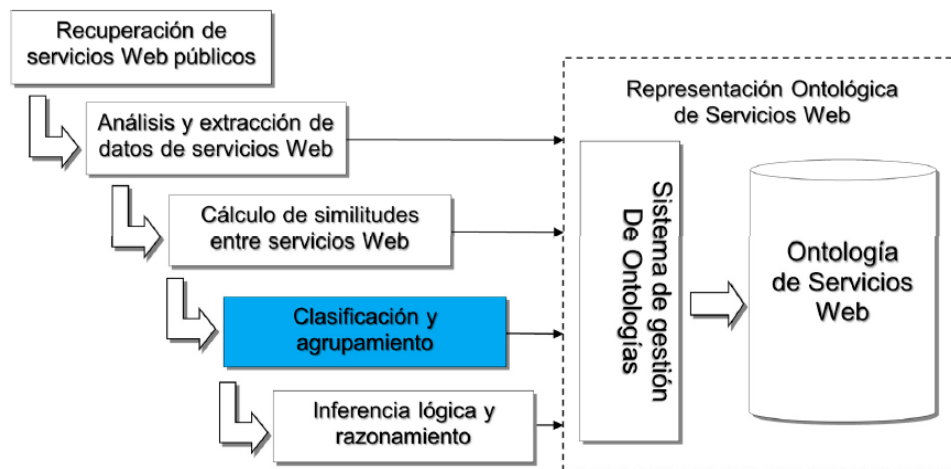


Figura 1 Arquitectura general del directorio semántico de servicios Web.

### 3. Diseño de la Solución

La estructura general de la solución propuesta emplea un algoritmo híbrido y se muestra en la figura 2, cuyo funcionamiento se describe con más detalle en las siguientes secciones.

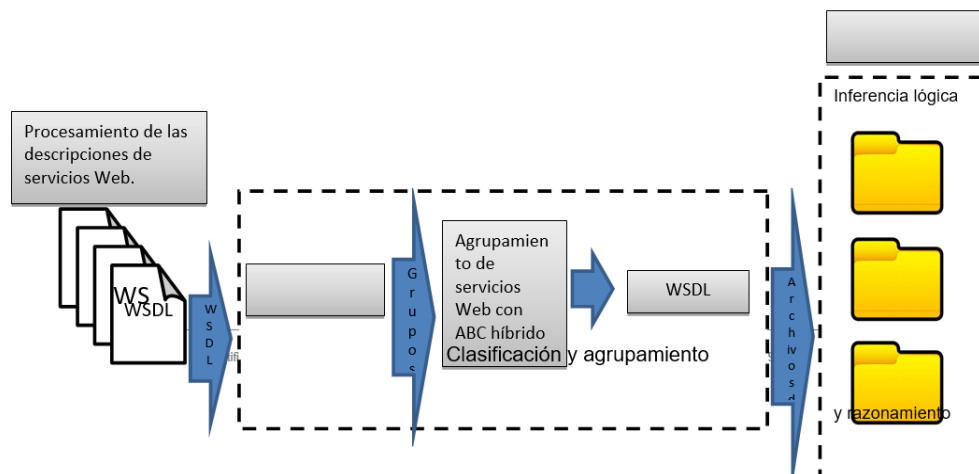


Figura 2 Arquitectura general de la solución propuesta para el agrupamiento de servicios.



El proyecto consta de los siguientes módulos:

- Colección de servicios Web local. Consiste de una gran colección de servicios Web, que se usan de entrada a todo el proceso para ser agrupados, los servicios Web de esta colección fueron previamente recuperados y almacenados localmente mediante arañas Web.
- Módulo de procesamiento de las descripciones de los servicios web. Este módulo realiza la tarea de recuperar y preprocesar toda la información de los servicios web para su posterior agrupamiento.
- Módulo de agrupamiento de los servicios web mediante el algoritmo híbrido. Este módulo determina cuántos grupos deben generarse, determina los centros de los grupos, y agrupa los servicios en función de los centros generados.
- Repositorio para los servicios web agrupados. Este módulo alberga todos los servicios web organizados en grupos, el objetivo de este módulo es obtener un esquema de agrupamiento óptimo.

•

#### **4. Descripción del Algoritmo Colonia Artificial de Abejas**

La idea principal del algoritmo Colonia Artificial de Abejas (ABC) es imitar el comportamiento de búsqueda y recolección de alimento haciendo uso de recursos muy específicos como son:

- Exploración. Acción que realizan las abejas desempleadas para buscar y localizar nuevas fuentes de alimento.
- Explotación. Tarea que llevan a cabo las abejas obreras en una fuente de alimento.
- Reclutamiento. Acción que realizan las abejas desempleadas con las abejas obreras para explotar una fuente de alimento.
- Abandono. Sucede cuando se encuentra una mejor fuente de alimento.
- El algoritmo ABC está compuesto por dos grupos de abejas: las abejas obreras y las abejas en espera. Las abejas en espera se subdividen a su vez en: abejas exploradoras y en abejas espectadoras, estas dos clases de abejas (obrero y espectadora) tienen la característica de elegir y ajustar

mediante su experiencia (memoria) la fuente de alimento. En el algoritmo ABC se asume que cada posición de la fuente de alimento equivale a una solución factible y la cantidad de alimento que se recolecta de la fuente de alimento representa la calidad asociada a la solución [2], la figura 3 resume el algoritmo del ABC.

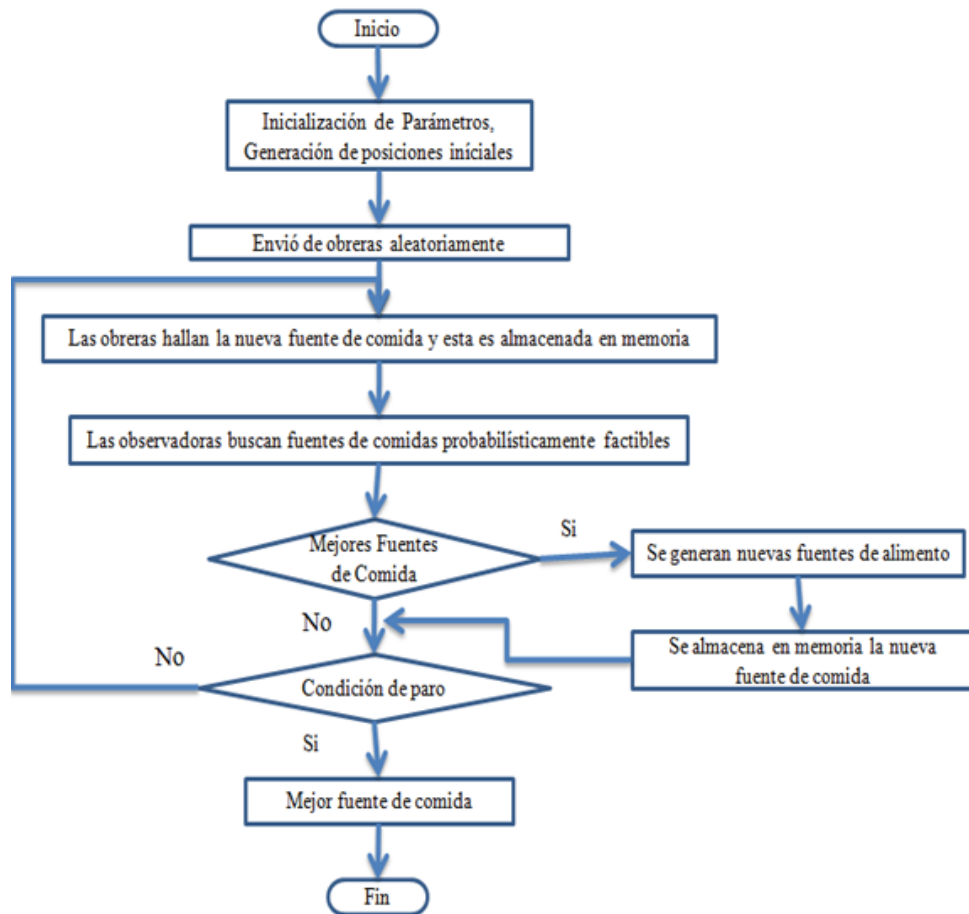


Figura 3 Diagrama general del algoritmo ABC.

La figura 4 muestra la gráfica del comportamiento del algoritmo ABC, donde el color azul representa a las abejas obreras, el color verde representa a las abejas exploradoras, el color purpura representa la mejor solución obtenida, el color rojo representa el óptimo deseado. La gráfica del lado izquierdo (a) muestra como comienza el algoritmo ABC posicionando a las obreras aleatoriamente, del lado derecho (b) muestra el resultado después de una serie de ejecuciones que la solución factible es alcanzada.

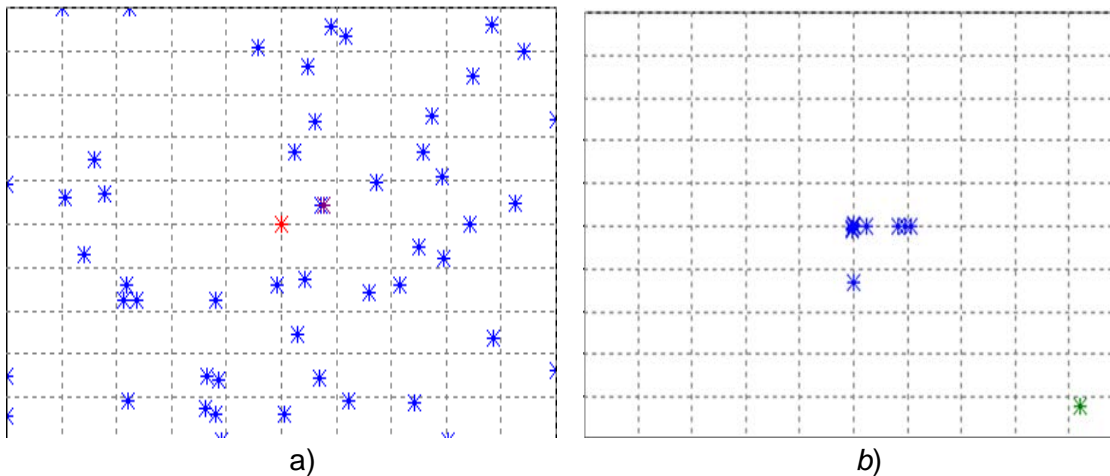


Figura 4 Gráfica del comportamiento del algoritmo ABC.

La combinación de otros métodos de agrupamiento como es el caso del método de consenso, permite al algoritmo bio-inspirado la creación de grupos que se generan desde 2 grupos (valor mínimo de grupos permitidos) hasta el número de servicios Web que se utilizan entre 2 (valor máximo de grupos que se podrán generar). Para el caso del método K-Medias, el algoritmo selecciona elementos dentro de los grupos generados anteriormente convirtiéndolos en centros con los cuales se podrá medir la similitud, también el algoritmo híbrido hace uso de métodos heurísticos al generar números aleatorios que el algoritmo utiliza para el cálculo en la generación de grupos.

La solución se presenta como un vector de entrada de tamaño n (número de servicios Web a agrupar) donde el elemento en el vector, devolverá el grupo al que pertenece. La función objetivo que el algoritmo híbrido emplea está dada por ecuación 1.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^c d(x_i, y_i)$$

$x_i \in c_i$   
 $y_i \in c_i$

Donde:

$d$ : Distancia

$y_i$ : Centro del i-ésimo grupo

$x_i$ : Uno de los servicios incluidos en el i-ésimo grupo. Ningún grupo puede estar vacío y no puede existir intersección entre los grupos.

## 5. Descripción del Algoritmo Híbrido

La primera etapa que realiza el algoritmo híbrido es la filtración de las 8 matrices que contienen la información de similitudes de los servicios Web mediante la ecuación 2, descartando valores que excedan los límites permitidos y establecidos por las mismas métricas, se generan nuevas matrices filtradas con un 95% de certeza en las mediciones.

$$X - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq X + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (2)$$

Donde:

$X$  : Matriz Promedio.

1.96 : Constante.

$\sigma$  : Desviación estándar.

$N$  : Elemento de la matriz de similitud.

$\mu$  : Similitud Promedio.

Posteriormente filtradas las 8 matrices todos los datos obtenidos se almacenan en una matriz promedio (fuentes de alimentos) descartando las posiciones que contengan información nula ó 0 es decir se promediaron todos aquellos valores que si fueron filtrados y aceptados como valores factibles cuya información si aporta gran ayuda al algoritmo.

Para después leer la matriz de similitud promedio para generar por primera vez una serie de arreglos (abejas) los cuales tendrán almacenada información, por ejemplo, los grupos generados, los centros seleccionados etcétera (Figura 5).

32231	32001	1.068	1.55	0.301	0.36	3	5
Grupos generados		$\beta$	$\alpha$	Normalización	Valoración	Max grupo	Limite

Figura 5 Composición del vector con información de los grupos generados.

En la figura 5 se muestra la estructura de una solución generada por el híbrido propuesto. A continuación se describe a detalle cada uno de los elementos que la conforman:

- a) Max grupo. El algoritmo propuesto no requiere que el usuario a priori indique cuantos grupos debe generar, a medida que itera éste determina cuantos grupos debe generar en función de los resultados obtenidos y la idea de consenso. Inicialmente, la  $i$ -ésima abeja generara un número aleatorio el número de grupos a generar, con base a una distribución uniforme discreta con limites 2 a  $N/2$ ; en las subsecuentes iteraciones del algoritmo, la  $i$ -ésima abeja producirá un número aleatorio  $\phi_i$  (con base a una distribución normal de media la varianza ponderada del Max grupo determinado por la colonia en la iteración anterior), posteriormente se aplicara un redondeo simple a  $\phi_i$  (en caso de asignará el valor violado).
- b) A continuación, la  $i$ -ésima abeja debe determinar los centroides de los  $\gamma$  grupos implicados en la clasificación. El sub-vector centroides se conforma por  $N$  elementos enteros; donde  $x_{ijk}$  es cero si no es considerado como centriode para ningún grupo, en caso que  $x_{ijk} = a$  implica que el  $j$ -ésimo servicio web es centriode del  $k$ -ésimo grupo. Inicialmente dichos valores se asignan aleatoriamente.
- c) Posteriormente mediante la ecuación 3 se obtienen los valores del sub-vector.

$$X'_{new} = \text{round} (X'_i - \phi(X'_i - X'_s)) \quad (3)$$

Dónde:

$X'_{new}$ : Nuevo vector generado.

$X'_i$ : Primer vector que genera el algoritmo.

$\phi$ : Numero Aleatorio entre 0 y 1.

Debe hacerse notar, que el vector  $X'_{new}$  es reparado con objeto que sólo  $k$  elementos sean diferentes de cero y todos los grupos tengan un centriode diferente.

- d) El sub-vector grupos generados se construye tomando como base el sub-vector centriode los elementos cero se remplazan por el valor  $k'$  que es el centriode más cercano al servicio web.

- e) es la sumatoria de la similitud entre centroides de los grupos mientras que  $\alpha$  es la sumatoria de la similitud entre miembros de cada grupo al centroe correspondiente. Se busca minimizar  $\beta$  y maximizar  $\alpha$  de manera simultánea.
- f) Para cada una de las abejas se determina el valor de  $f(x)=1/\beta + \alpha$  se busca que este valor de  $f(x)$  sea lo mayor posible. El valor de  $f(x)$  se guarda en el vector la solución en la celda de valoración.
- g) La normalización implica  $n_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)}$  este elemento servirá para determinar la calidad de la fuente de alimento encontrada. Una abeja abandonara su fuente de alimento actual si la fuente de alimento explorada en su vecindario es mejor.
- h) Limite es un contador que indica el número de iteraciones que la abeja ha permanecido en la fuente de alimento actual, cuando se llega a un valor  $g$ , y siempre y cuando la abeja no se encuentre en la mejor fuente de alimento encontrada, la  $i$ -ésima abeja es obligada a abandonar su fuente de alimento actual.

En las figuras 6 , 7 y 8 se muestra el pseudocódigo del algoritmo propuesto.

```

Entrada: Número de abejas (N), Matriz de similitud filtrada, Número de servicios web a agrupar (M), número de iteraciones máximas a realizar por el algoritmo (v), valor de  $\Phi$ 
Salida: Mejor clasificación encontrada por el ABC
1 Para cada una de las N fuentes de alimento aplicar el algoritmo de la Fig. 7
2 Calcular el valor de normalización
3  $v=0$ 
4 Mientras  $v \leq v$ 
5 Determinar el promedio ( $\bar{c}$ ) y varianza ( $S_c$ ) ponderado (con base en los valores de la normalización) de los grupos empleados por las abejas en la  $v-1$  iteración.
6 Para cada una de las abejas
7 Buscar una fuente de alimento en el vecindario de  $i$  con base en la Fig. 8
8 Si el valor de  $f(x_{new})$  es mejor que el valor  $f(x)$ 
9 Mover a la abeja obrera a la nueva fuente de alimento
10 limite =0
11 Si no
12 limite = limite +1;
13 Termina Si
14 Si limite = g
15 Aleatoriamente generar una nueva fuente de alimento
16 Mover a la  $i$ -ésima abeja a esa nueva fuente de alimento
17 Termina Si
18 Termina Para
19 Termina mientras
20 Seleccionar la abeja con mejor valor de  $f(x)$ 
    
```

Figura 6 Pseudocódigo del híbrido generado.

- 1 Determinar aleatoriamente el número de grupos a construir (es un valor uniforme distribuido entre 2 y  $M/2$ )
- 2 Determinar aleatoriamente los centroides de cada grupo. (Construcción del sub-vector centroides)
- 3 Colocar a cada uno de los  $M$  servicios web en uno de los grupos en función de la similitud a los centroides (aplicación del algoritmo de k-centroides clásico)
- 4 Determinar el valor de valoración de correspondiente

Figura 7 Pseudocódigo de la fase “Generación de  $N$  fuentes de alimento iniciales”.

- 1 Sea  $\alpha$  un numero aleatorio con distribución normal con media ( $\bar{x}$ ) y varianza ( $S_c$ )
- 2 El número de grupos a utilizar por la  $i$ -ésima abeja es el valor redondeado  $\alpha$  que se encuentre dentro de los límites
- 3  $i'$  es una fuente de alimento distinta a  $i$  seleccionada aleatoriamente con base en el valor de la normalización.
- 4 Tomar los sub-vectores centroides de  $i$  e  $i'$
- 5  $x_{new}$  es una combinación de los sub-vectores centroides de  $i$  e  $i'$  mediante la ecuación (2)
- 6 Reparar  $x_{new}$  de forma tal que contenga exactamente  $\alpha$  celdas distintas de cero, cada una tome un valor entre  $i$  y  $\alpha$  distinto.
- 7 Para cada uno de los  $m$  servicios web
- 8     Determinar la similitud a los centroides del  $j$ -ésimo servicio.
- 9     Asignar al  $j$ -ésimo servicio el grupo de mayor similitud.
- 10 Termina Para
- 11 Calcular  $\beta$ ,  $\alpha$  y  $f(x_{new})$

Figura 8 Pseudocódigo de la fase “Buscar una fuente de alimento en el vecindario de  $i$ ”.

## 6. Implementación

Se clasificaron tres instancias, las cuales implicaron agrupar de 50, 647 y 1027 servicios web respectivamente. Para la creación de la matriz de similitud filtrada inicialmente se calculó la similitud mediante 8 métricas distintas para cada una de las instancias, posteriormente se utilizó el procedimiento descrito con anterioridad a fin tamizar la información encontrada.

La determinación de los parámetros utilizados por el algoritmo se realizó por fuerza bruta, dando como resultado utilizar 10 y el valor de “phi” ( $\phi$ ) se estableció en 0.8, el valor del límite que conforma cada vector desde un principio se estableció con el valor de 10.

A fin de caracterizar el comportamiento del algoritmo se realizaron 20 ejecuciones con 100, 200 y 500 iteraciones del algoritmo. Para cada una de las ejecuciones se determinó el mejor valor de  $f(x)$  encontrado por las abejas. Posteriormente, se realizó un análisis estadístico de los resultados encontrados

## 7. Resultados

Las tablas 1, 2 y 3 muestran los valores promedios de  $f(x)$  para cada una de las instancias con 100, 200 y 500 iteraciones respectivamente.

Tabla 1 Resultados promedios de las instancias con 100 iteraciones.

Tamaño Matriz	F(x)
50	0.4631
647	0.4457
1027	0.4414

Tabla 2 Resultados promedios de las instancias con 200 iteraciones.

Tamaño Matriz	F(x)
50	0.5011
647	0.4152
1027	0.4782

Tabla 3 Resultados promedios de las instancias con 500 iteraciones.

Tamaño Matriz	500 iteraciones
50	0.5169
647	0.4228
1027	0.4542

Con base en las tablas anteriores, se puede afirmar que para la instancia de 50 servicios los mejores valores se encuentran con 500 iteraciones, mientras que para la instancia de 647 servicios los mejores valores se obtienen con 100 iteraciones. Finalmente, para la instancia de 1027 se obtiene con 200 iteraciones.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en forma de tablas con las mejores configuraciones, también se muestran las gráficas resultado de las mismas. En la tabla 4 se muestran el mejor, el peor, promedio, varianza y desviación estándar de  $f(x)$  sobre las 20 ejecuciones del algoritmo.

En la tabla 5 se muestran el mejor, el peor, promedio, varianza y desviación estándar del número de grupos sobre las 20 ejecuciones del algoritmo.

En las figuras 8 y 9 se muestra un comparativo de resultados obtenidos del algoritmo con 100, 200 y 500 iteraciones del algoritmo en la instancia de 1027 servicios. En ella se puede observar que los mejores valores de  $f(x)$  se producen



con 500 iteraciones, sin embargo, el resultado de número de grupos implicados es más estable y menor con 200 iteraciones.

Tabla 4 Resumen con los mejores resultados de la similitud.

Instancia-iteraciones	Mejor	Peor	Promedio	Varianza	Desviación
50-100	0.58936208	0.29274988	0.45901481	0.00593354	0.0770295
50-200	0.54853117	0.44904535	0.50052478	0.00088301	0.02971549
50-500	0.57163535	0.46554965	0.51820976	0.00090081	0.03001343
647-100	0.54947584	0.2153186	0.44401451	0.01027133	0.10134758
647-200	0.54778745	0.20257995	0.40923046	0.01554565	0.12468218
647-500	0.54881541	0.22262872	0.41911288	0.01280278	0.11314939
1027-100	0.55531806	0.27378002	0.44488931	0.00847871	0.09207991
1027-200	0.56846422	0.28919387	0.47529505	0.00772078	0.08786795
1027-500	0.66112025	0.20302145	0.4674717	0.00977301	0.09885856

Tabla 5 Resumen con los mejores resultados de los Grupos.

Instancia-iteraciones	Mejor	Peor	Promedio	Varianza	Desviación
50-100	2	10	4.31578947	6.22105263	2.49420381
50-200	2	4	3	0.89210526	0.94451324
50-500	2	6	3.94736842	2.36578947	1.53811231
647-100	3	49	18.0526316	221.207895	14.8730594
647-200	2	67	18.9473684	305.831579	17.488041
647-500	2	73	23.2105263	426.368421	20.6486905
1027-100	2	110	31.2631579	1066.82895	32.6623475
1027-200	2	69	22.1052632	355.884211	18.8648936
1027-500	2	123	31	1179.21053	34.3396349

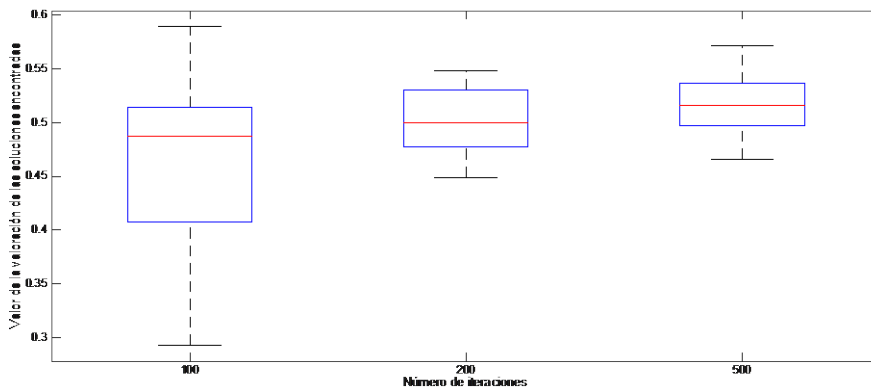


Figura 8 Similitud entre las mejores soluciones encontradas con 1027 servicios.

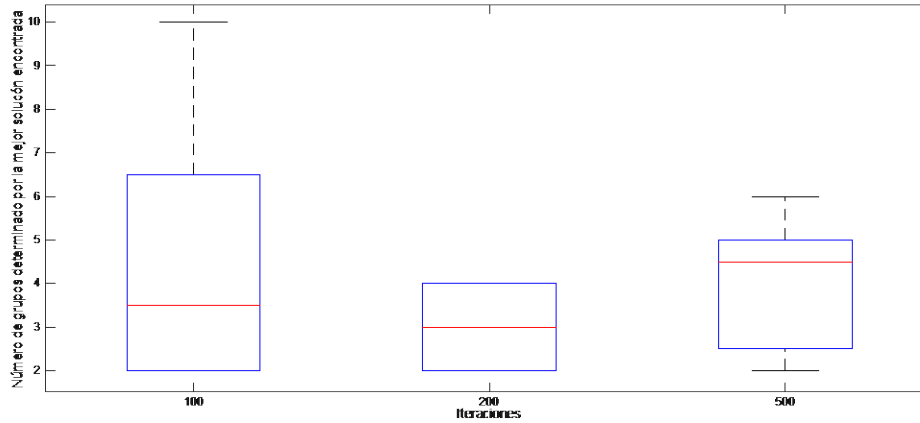


Figura 9 Comparativo del número de grupos en el mejor caso para 1027 servicios.

## 8. Trabajos Relacionados

El tema de agrupamiento y clasificación de servicios Web ha sido estudiado ampliamente desde diferentes perspectivas que abarcan desde enfoques estadísticos, estocásticos y sus variantes. Asimismo, se ha abordado con enfoques novedosos en el ámbito de los servicios web semánticos mediante ontologías y motores de inferencia. Sin embargo, poco se ha hecho para abordar el problema empleando algoritmos híbridos, meta-heurísticas y algoritmos biológicamente inspirados. En esta sección se presenta una revisión de los trabajos relacionados con el tema de clasificación y agrupamiento de servicios Web, así como algunos trabajos que reportan el empleo de algoritmos biológicamente inspirados aplicados en servicios Web.

En 2004 Dong [4] presentó un enfoque de agrupamiento para realizar la búsqueda de servicios Web. Esta búsqueda consistió en dos etapas principales: el usuario proporcionaba palabras clave en un buscador de servicios, con los servicios devueltos por el buscador, el sistema de agrupamiento extraía los conceptos semánticos de las descripciones en lenguaje natural contenidas en las descripciones de los servicios Web. Con ayuda de la co-ocurrencia de términos en los nombres de los parámetros de entrada y salida y en los nombres de las operaciones, el cálculo de similitudes se realizó para emplear el algoritmo de agrupamiento aglomerativo y clasificar los términos en conceptos significativos. Mediante la combinación de las palabras clave originales y los conceptos

extraídos de las descripciones de los servicios la similitud de dos servicios se realiza al nivel de conceptos. Desde el punto de vista del empleo de conceptos, este enfoque es similar al que se describe en este artículo, sin embargo, el algoritmo de agrupamiento que se empleó difiere significativamente.

En 2007 Arbramowicz et. al [5] propuso una arquitectura para el filtrado y agrupamiento de servicios Web. Este enfoque se considera dentro del tema de investigación de los servicios Web semánticos, ya que el autor empleó servicios descritos con el lenguaje OWL-S (Web Ontology Language for Web Services, por sus siglas en inglés). El filtrado de servicios se basa en los perfiles que representan a los usuarios y la información de la aplicación. Para mejorar el filtrado de servicios, se propone el empleo de un método de agrupamiento. El propósito de este enfoque era apoyar el proceso de conciliación entre servicios, ahorrando tiempo de ejecución y mejorando el refinamiento de los datos almacenados.

## **9. Conclusiones**

Las meta-heurísticas representan un aliado poderoso para resolver problemas de optimización en diferentes dominios de aplicación. En este trabajo se presentó una adaptación al algoritmo ABC para obtener un mejor enfoque de agrupamiento de servicios. El algoritmo ABC ha mostrado buenos resultados para el agrupamiento de servicios, más modificaciones son posibles, por ejemplo, la medición de similitudes semánticas, así como incorporar más información de la descripción de los servicios y los tipos de datos. Como trabajo a futuro se implementarán otros algoritmos bio-inspirados para la clasificación y agrupamiento de servicios Web.

## **10. Bibliografía y Referencias**

- [1] D. Floreano, C. Mattiussi, *Bio-Inspired Artificial Intelligence Theories, Methods and Technologies*, The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, Englan, 2008.

- [2] B. Xing, J. Wen, "Innovative Computational Intelligence: A Rough Guide to 134 Clever Algorithms". Springer. Volume 62. 2014.
- [3] S. Binitha, S S. Sathya, "A Survey of Bio inspired Optimization Algorithms". International Journal of Soft Computing and Engineering. Volume 2. Issue 2. May 2012.
- [4] X. Dong, A. Halevy, J. Madhavan, E. Nemes, J. Zhang, "Similarity Search for Web services". In Proceedings of the 30th VLDB Conference. 2004.
- [5] W. Abramowicz, K. Haniewicz, M. Kaczmarek, D. Zyskowski, Architecture for Web services filtering and clustering. In Internet and Web Applications and Services. 2007. Pag. 18.

## **11. Autores**

Dra. Maricela Claudia Bravo Contreras obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación en el 2006 por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Desde mayo de 2011 se encuentra trabajando como Profesora Investigadora en el Departamento de Sistemas de la UAM Azcapotzalco. Actualmente es miembro del Área de Investigación en Sistemas de Información Inteligentes ([www.aisii.azc.uam.mx](http://www.aisii.azc.uam.mx)). Sus principales áreas de interés son: composición automatizada y optimización de servicios Web públicos, diseño y desarrollo de Ontologías aplicadas en la solución de problemas de ingeniería; diseño e implementación de aplicaciones de cómputo móvil, cómputo ubicuo y sistemas sensibles al contexto; estudio de sistemas distribuidos adaptativos basados en agentes inteligentes.

Dr. Román Anselmo Gutiérrez obtuvo el grado de Doctor en Investigación de Operaciones en la Universidad Nacional Autónoma de México en 2014. Actualmente es profesor investigador del Departamento de Sistemas de la UAM Azcapotzalco, también es miembro del Área de Investigación de Optimización Combinatoria. Sus principales áreas de interés son: optimización, heurísticas y meta-heurísticas, y sistemas de múltiples agentes.

Ing. Iván Flores Sánchez es graduado de la Licenciatura en Ingeniería en Computación por la Universidad Autónoma Metropolitana.

M.C. Roberto A. Alcántara Ramírez obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el T.E.S.E en 2008. Es Ingeniero en Electrónica, por la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Desde 1987 se desempeña como Profesor Investigador de tiempo completo en el Departamento de Electrónica de la UAM-Azcapotzalco. Desde 1998 es miembro del Área de Investigación de Control de Procesos, donde desarrolla trabajos de Investigación en las áreas de Instrumentación, Control de Procesos y Electrónica de Potencia. De 2009 a 2013 fungió como Coordinador de la Licenciatura en Ingeniería Electrónica. Actualmente se desempeña como Jefe del Departamento de Electrónica.

# **SISTEMA DE DETECCIÓN DE PUNTOS DE ACCESO WIFI EN UN CENTRO DE DATOS**

***José Ignacio Vega Luna***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*viji@correo.azc.uam.mx*

***Mario Alberto Lagos Acosta***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Gerardo Salgado Guzmán***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Víctor Noé Tapia Vargas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

***Francisco Javier Sánchez Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

## **Resumen**

Se presenta la implantación de un sistema que detecta puntos de acceso WiFi no autorizados en un centro de datos que puedan vulnerar la seguridad de la información. El sistema consiste de tres módulos: el módulo de detección WiFi, el módulo supervisor y la interface de usuario. Se construyeron cinco módulos de detección WiFi instalados en diferentes puntos del centro de datos los cuales se comunican inalámbricamente con el módulo supervisor conectado a una computadora donde se ubica la interface de usuario. La computadora se localiza en una oficina de control y monitoreo. Periódicamente la interface de usuario solicita al módulo supervisor, conectado al puerto USB de la computadora, transmitir la orden de exploración de señal WiFi a cada módulo de detección, al recibir esta orden los módulos envían el nombre de los puntos de acceso detectados. La interface de usuario muestra el nombre de los puntos de acceso

detectados no autorizados, registrándolos con fecha y hora en un archivo diario. La comunicación entre los módulos de detección y el módulo supervisor se realiza usando transceptores ZigBee. El alcance entre los módulos de detección y la oficina de control fue 95 metros y el alcance de detección fue 50 metros.

**Palabra(s) Clave(s):** centro de datos, microcontrolador, USB, WiFi, ZigBee.

## 1. Introducción

En el ámbito de comunicaciones inalámbricas, un punto de acceso WiFi (hotspot) es un lugar desde el cual se puede acceder a la Internet usando una red inalámbrica y un router. Un hotspot contiene uno o varios routers para cubrir un área donde la demanda de tráfico es alta [1]. El acceso a un hotspot es mediante una computadora, teléfono móvil, tableta u otro router. En algunas empresas existen hotspots en lugares específicos y bajo control. La red WiFi de un hotspot usa transceptores que trabajan a 2.4 GHz (802.11b y 802.11g) o 5 GHz (802.11a) con alcance de 30 a 300 metros dependiendo del tipo de antena y potencia de transmisión [2].

Un centro de datos es un espacio donde empresas e instituciones instalan, mantienen y operan su infraestructura de TIC (Tecnologías de Información y Comunicaciones) usada para realizar las actividades de su negocio y giro. En este espacio se alojan servidores, sistemas de almacenamiento y equipo de comunicaciones para la ejecución y acceso de aplicaciones. Existen empresas con grandes instalaciones que proporcionan servicios de un centro de datos a clientes que necesitan centrar su atención en las actividades propias de su negocio olvidándose del funcionamiento de un centro de datos. Estos centros de datos cuentan con instalaciones de alta tecnología redundantes en lo que respecta a piso falso, enfriamiento, ventilación, energía eléctrica, cableado, detección y extinción de incendios, detección de fugas de agua, controles de seguridad y acceso, así como facilidades de comunicación de datos. Los clientes, usuarios, administradores y operadores de los centros de datos acceden los sistemas de cómputo de forma remota o local, los usuarios que lo hacen localmente usan redes alambradas o inalámbricas. Dada la extrema seguridad requerida en el

acceso a la información, la cantidad de redes inalámbricas WiFi y hotspots en un centro de datos debe ser limitada y bajo control de los administradores del mismo [3]. Los clientes y usuarios externos pueden instalar y usar routers WiFi temporalmente cuando sea estrictamente necesario para realizar sus actividades con previa autorización. Estas medidas de seguridad son certificadas por instituciones y organismos que auditan el funcionamiento, operación y calidad de servicios de centros de datos. Cada punto de acceso WiFi permanente o temporal en el centro de datos es registrado. Una necesidad actual, simple y existente es detectar puntos de acceso no autorizados, los cuales en ocasiones son instalados sin malas intenciones o por error y representan riesgo en la seguridad de datos o pueden interferir con redes WiFi existentes. El objetivo de este trabajo fue diseñar y construir un sistema confiable, de bajo costo, compacto y de fácil instalación que detecte puntos de acceso WiFi en diferentes áreas de un centro de datos, y transmita inalámbricamente su nombre a una interface de usuario para su registro. El desarrollo del trabajo fue a solicitud de una empresa que tiene centros de datos y ofrece sus servicios a una diversidad de clientes. Para diseñar el sistema se identificaron dos necesidades básicas: la detección de puntos de acceso y la transmisión inalámbrica con alcance de 75 metros donde se ubica la interface de usuario.

Existen soluciones que monitorean, configuran y operan puntos de acceso WiFi. Algunas soluciones sirven para monitorear puntos de acceso y determinar los servicios más utilizados por los usuarios [4, 5], otras determinan la calidad de servicio (tiempo de respuesta y cantidad de información transferida) de puntos de acceso [6] o realizan estadísticas de tiempo de permanencia de usuarios [7]. Se han desarrollado también trabajos que analizan el tráfico de redes WiFi y asignan canales de frecuencia a dispositivos terminales para mejorar la calidad de servicio [8, 9]. Respecto a aplicaciones del circuito ESP8266, usado en el trabajo aquí presentado, los trabajos realizados se han enfocado a utilizarlo para automatización de hogares y oficinas desde dispositivos móviles [10, 11, 12]. Aunque realmente es sencilla, no existe ninguna solución para detectar puntos de



acceso y mejorar la seguridad en centros de datos, como la aquí presentada, que cumpla con los requerimientos y tareas solicitadas en este trabajo.

Para la implantación de este trabajo se usó un circuito integrado del tipo SoC (System on Chip) de reciente tecnología para explorar el ambiente y detectar puntos de acceso WiFi. El SoC seleccionado fue el circuito ESP8266 [13]. El ESP8266 es un adaptador de Serie a WiFi de bajo consumo de energía que proporciona acceso a Internet para aplicaciones de dispositivos móviles e Internet de las cosas (IoT-Internet of Things), entre las cuales se incluyen: electrodomésticos, automatización de hogares y oficinas, cámaras IP, redes de sensores y dispositivos para acceso a redes WiFi. Las principales características del ESP8266 son las siguientes: tamaño compacto, económico, fácil de usar e incorpora diferentes funcionalidades que pueden configurarse y accederse desde un controlador.

El circuito ESP8266 proporciona conectividad WiFi de bajo costo a un microcontrolador liberándolo de realizar funciones de red WiFi o puede funcionar como procesador que ejecuta una aplicación, como por ejemplo un servidor web. Cuenta con memoria interna ROM para almacenar el firmware y se le puede conectar memoria externa flash de programa cuando funciona como procesador. El firmware implanta las siguientes funcionalidades: WiFi 802.11 b/g/n de 2.4 GHz, soporte de protocolos de red IPv4, TCP/UDP/HTTP/FTP, así como funciones de protocolos de bajo nivel RTS/CTS, reconocimiento, encapsulamiento y fragmentación de tramas (802.11h/RFC 1042). La figura 1 muestra el diagrama de bloques funcionales del ESP8266 entre los cuales se pueden distinguir los siguientes: adaptador de antena, transceptor de RF, CPU, memoria SRAM, reloj de tiempo real, watchdog, convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits, 17 terminales de entrada/salida, interfaces serie: UART (dos), I2C (Inter-integrated Circuit Interface), SPI (Serial Peripheral Interface), I2S (Integrated Interchip Sound, para transmisión de audio de alta fidelidad) y salida PWM. Todos estos bloques permiten conectar el ESP8266 a un controlador con mínima circuitería externa.

La CPU del circuito ESP8266 es un procesador de 32 bits que se puede programar usando el kit de desarrollo suministrado por el fabricante del circuito. La

CPU puede usarse para implantar funcionalidades adicionales como por ejemplo algoritmos de seguridad, pre-autenticación y prioridad de tráfico.

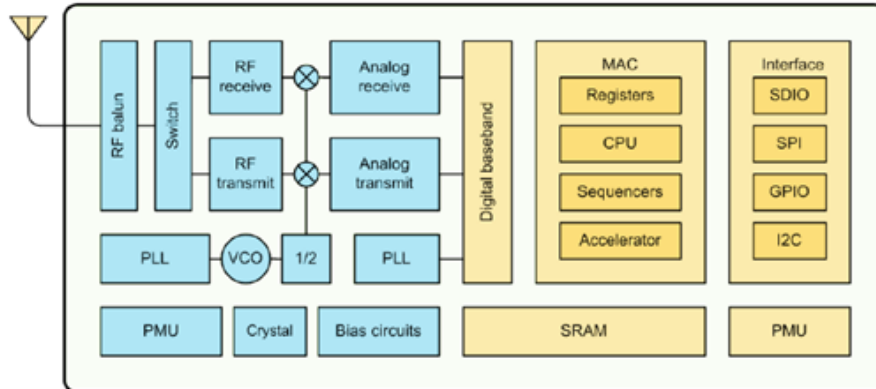


Figura 1 Diagrama de bloques del ESP8266.

El ESP8266 se alimenta con una fuente de 3.0 a 3.6 V y puede configurarse en uno de tres modos de operación: modo activo, modo suspendido (sleep) o modo suspendido profundo (deep sleep). En modo activo consume 50 mA. En modo sleep solo se encuentran activos el watchdog y el reloj de tiempo real y consume 0.9 mA, el circuito puede mantener la conexión a un punto de acceso. En modo deep sleep solo se encuentra activo el reloj de tiempo real y consume 60  $\mu$ A. El circuito puede programarse para despertar después de un tiempo configurado en el reloj de tiempo real o al suceder alguna condición específica. Además, puede configurarse en uno de tres modos de funcionamiento: estación, punto de acceso o mixto (estación y punto de acceso). En el modo estación, el ESP8266 proporciona acceso a una red WiFi al controlador conectado a una de sus interfaces serie. En modo punto de acceso proporciona acceso a una red WiFi a dispositivos conectados a él por RF.

Las características operacionales del ESP8266 se establecen enviando comandos AT desde un microcontrolador conectado a la interface UART0 del ESP8266 o desde una computadora conectando el UART0 al puerto USB de la computadora. En la computadora debe ejecutarse un programa emulador de terminal, como por ejemplo hyperterminal o Putty, para suministrar los comandos y mostrar la respuesta del circuito. El puerto UART0 puede configurarse a una velocidad entre

9.6 Kbps y 115.2 Kbps. Algunas características operacionales que pueden seleccionarse con comandos AT son las siguientes: inicializar el circuito (reset), listar puntos de acceso WiFi disponibles, mostrar versión de firmware, mostrar direcciones IP, establecer velocidad de interfaces serie, establecer modo de operación y establecer modo de funcionamiento.

En la implantación de este trabajo, para transmitir la información de puntos de acceso detectados por el ESP8266 a la interface de usuario, ubicada en la oficina de control y monitoreo del centro de datos, se usaron transceptores XBee-PRO (S2). Estos transceptores son compatibles con el estándar ZigBee. ZigBee es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación para redes inalámbricas de corto alcance y baja velocidad de datos [14]. ZigBee está basado en el estándar IEEE 802.15.4 de WPAN ya que usa la capa física y protocolos de control de acceso medio (MAC) de este estándar. ZigBee fue desarrollado para aplicaciones inalámbricas de bajo costo y ultra-bajo consumo de energía. En muchas aplicaciones de ZigBee, el tiempo que el dispositivo inalámbrico está involucrado en la actividad es limitado y se mantiene la mayor parte de tiempo en modo de ahorro de energía, conocido como modo de suspensión o reposo. Como resultado, los dispositivos ZigBee pueden trabajar varios años antes de reemplazar su batería. Inicialmente ZigBee se usó en aplicaciones domóticas y en años recientes se ha utilizado en diversas aplicaciones en los campos de control y monitoreo de procesos, industrial, medicina, agricultura, automotriz, entre otros, ya que se pueden configurar redes de malla con transceptores ZigBee. La relación entre IEEE 802.15.4-2003 y ZigBee es similar a la existente entre IEEE 802.11 y WiFi Alliance. ZigBee utiliza la banda ISM de uso industrial, científico y médico, la cual incluye: 868 MHz en Europa, 915 en Estados Unidos y 2.4 GHz en el resto del mundo y transmite a una velocidad máxima es 250 Kbps [15]. Sin embargo, la mayoría de dispositivos de este tipo usan de 2.4 GHz, por ser libre en todo el mundo. Las redes ZigBee pueden tener hasta 65,535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos. Las principales características operacionales de un nodo o transceptor ZigBee son las siguientes: consume aproximadamente 30 mA transmitiendo y 3  $\mu$ A en reposo, permanece la mayor parte del tiempo suspendido

o en reposo y su velocidad máxima es 250 Kbps. Los transceptores ZigBee se utilizan en aplicaciones sensibles al uso de energía en las cuales la transferencia de datos es menor que otras tecnologías inalámbricas como por ejemplo Bluetooth. Algunas de estas aplicaciones son para monitoreo de variables y procesos y control de actuadores [16].

Dependiendo de la función en la red, un nodo ZigBee puede ser uno de tres tipos siguientes:

- **Coordinador.** Es el modo más completo de un transceptor ZigBee. En una red ZigBee debe existir al menos un coordinador, ya que su función es el control de la red y las rutas que deben seguir los dispositivos para conectarse entre sí.
- **Router.** Su función es conectar dispositivos separados en la topología de la red y ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario.
- **Dispositivo final.** Realiza la función de comunicarse con su nodo padre (coordinador o router), pero no puede transmitir información a otros dispositivos. Este tipo de nodo puede estar suspendido la mayor parte del tiempo para aumentar la vida útil de sus baterías. Tiene requerimientos mínimos de memoria y es más económico que los dos tipos anteriores.

## **2. Desarrollo**

El primer paso de la metodología usada en el diseño de este trabajo fue dividirlo en tres módulos: el módulo remoto de detección WiFi, el módulo supervisor y la interface de usuario. En la figura 2 se indica el diagrama de bloques del sistema construido. El segundo paso fue especificar las funciones de los componentes de cada módulo.

El tercer paso fue seleccionar los componentes de acuerdo a las características indicadas en el objetivo del sistema y su función en cada módulo, y el último paso fue conectar y configurar los componentes del sistema. La función de cada módulo, características y componentes se explican a continuación.

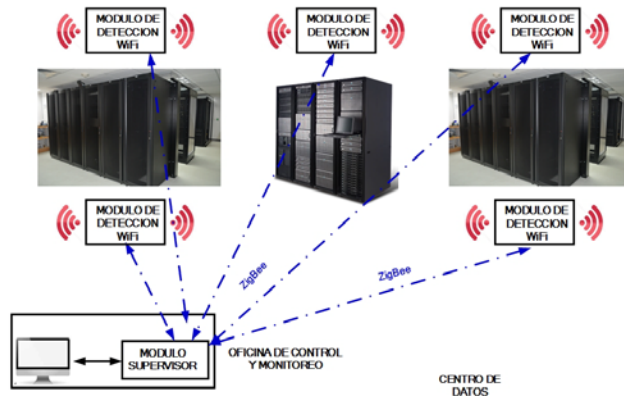


Figura 2 Diagrama de bloques del sistema.

### El módulo remoto de detección WiFi

Este módulo está compuesto por tres elementos como se indica en el diagrama de bloques de la figura 3: el circuito detector y de acceso a WiFi, el adaptador de niveles, el microcontrolador y el transceptor ZigBee.

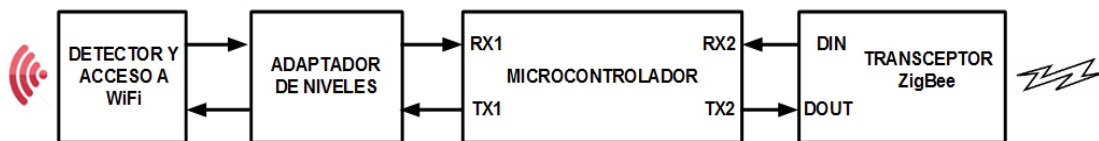


Figura 3 Diagrama de bloques del módulo de detección WiFi.

La función de detección de redes WiFi la realiza el circuito ESP8266. Para acceder y configurar el ESP8266 desde el microcontrolador, se usó el puerto EUSART1 del microcontrolador conectado al puerto UART0 del ESP8266. No se conectaron directamente ambos puertos, ya que el ESP8266 se alimenta con 3.3 V y el nivel de voltaje de las terminales de su puerto UART0 son también de 3.3 V, mientras que el nivel de voltaje de las terminales del EUSART1 del microcontrolador son 5 V. Para adaptar los niveles de voltaje, se utilizó el circuito bidireccional BP1. El circuito BP1 se alimenta con 5 V y sus terminales A1 y A2 se conectaron a las terminales RX1 y TX1, respectivamente, del puerto EUSART 1 del microcontrolador como se indica en la figura 4.

El circuito ESP8266 se configuró desde el programa que se ejecuta en el microcontrolador enviando comandos AT. La configuración establece las

siguientes funciones: modo activo, como estación y velocidad de 9.6 Kbps. Se configuró como estación porque la tarea del circuito es solo explorar el ambiente e indicar el nombre de las redes WiFi detectadas en su vecindad. Se estableció velocidad de 9.6 Kbps porque la cantidad de información que envía el ESP8266 a la interface de usuario no es grande.

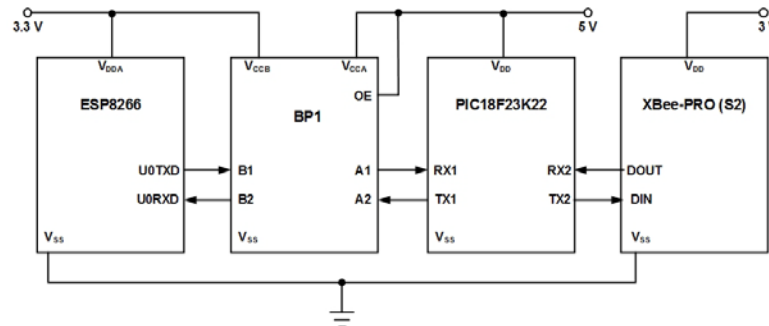


Figura 4 Diagrama de conexión de componentes del módulo de detección WiFi.

El microcontrolador usado en este módulo es el PIC18F23K22, este dispositivo cuenta con los siguientes recursos: CPU de 8 bits, memoria de programa flash de 8 kBytes, memoria RAM de 512 Bytes, tres puertos paralelo, dos puertos serie EUSART, convertidor analógico/digital (ADC) de 30 canales y 10 bits, siete temporizadores y dos puertos serie síncronos (Master Synchronous Serial Port-MSSP). La programación que se ejecuta en el microcontrolador inicializa los puertos EUSART, inicializa los temporizadores 1 y 2 (para generar el baud rate de los EUSART), configura el circuito ESP8266 y a continuación entra a un ciclo donde espera la orden de detección de WiFi enviada por el módulo supervisor. Al recibir la orden, el microcontrolador envía, por medio del puerto EUSART1 el comando AT+CWLAP al circuito ESP8266 para indicarle que explore los puntos de acceso WiFi existentes en su periferia. Cuando el ESP8266 responde con el nombre de las redes detectadas, el microcontrolador transmite, por medio del puerto EUSART2, esta información al transceptor ZigBee. Esta programación se implantó usando lenguaje mikroC PRO FOR PIC siguiendo el diagrama de flujo de la figura 5. La secuencia de comandos enviados por el microcontrolador para configurar el circuito ESP8266 se muestra en la figura 6.

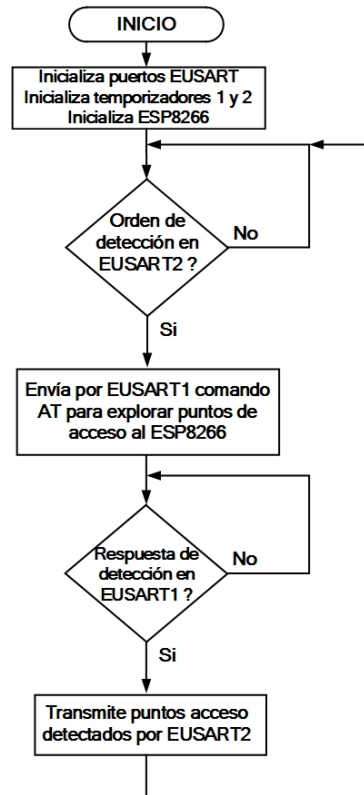


Figura 5 Diagrama de flujo de la programación del módulo de detección WiFi.

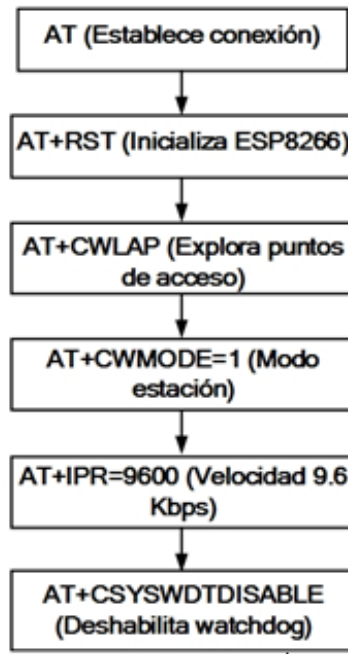


Figura 6 Secuencia de comandos AT enviados para inicializar el circuito ESP8266.

Para comunicarse con el módulo supervisor, cada módulo de detección tiene un transceptor ZigBee. El puerto EUSART2 del microcontrolador se conectó al puerto UART del transceptor ZigBee para transmitir al módulo supervisor el nombre de las redes detectadas y el identificador del módulo de detección (número de serie del transceptor XBee). Se seleccionaron transceptores ZigBee porque son de tecnología inalámbrica que no requieren instalar cableado adicional ni modificar la infraestructura de comunicaciones actual del centro de datos y además su señal no interfiere con las redes WiFi usadas.

El transceptor usado fue el circuito XBee-PRO (S2), este circuito es un dispositivo compatible con el protocolo ZigBee 802.15.2, cuenta con antena integrada que puede transmitir información inalámbrica a una distancia máxima de 300 pies (90 m) en interiores, se alimenta con una fuente de 3.3 V y puede configurarse para trabajar en una red de malla, lo que le permite extender su rango de transmisión usando routers ZigBee. El circuito XBee-PRO (S2) del módulo de detección WiFi se configuró como router y se estableció una velocidad de 9.6 kbps para comunicarse con el puerto EUSART2 del microcontrolador. De esta manera, se pueden instalar uno o varios módulos de detección WiFi en diferentes ubicaciones del centro de datos reportando al módulo supervisor conectado al puerto USB de una computadora localizada en la oficina de monitoreo y control.

### El módulo supervisor

Este módulo está compuesto por el transceptor ZigBee y el microcontrolador, como se puede ver en el diagrama de bloques de la figura 7.

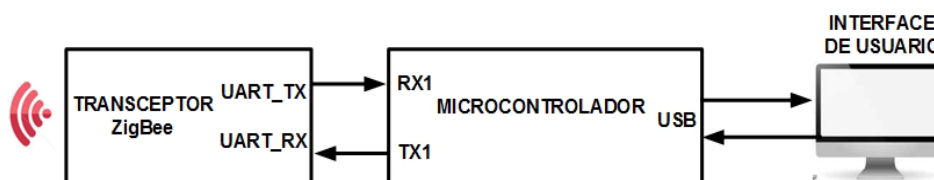


Figura 7 Diagrama de bloques del módulo supervisor.

En este módulo también se usó el transceptor XBee-PRO (S2), el cual se configuró como coordinador para comunicarse con el puerto EUSART del



microcontrolador a una velocidad de 9.6 Kbps. Se utilizó un PIC18F4550 porque cuenta con los siguientes recursos, suficientes para la función del módulo supervisor: CPU de 8 bits, memoria de programa flash de 32 kBytes, memoria RAM de 2,048 Bytes, cuatro puertos paralelo, puerto serie EUSART, puerto USB, cuatro temporizadores y puerto serie síncrono (Master Synchronous Serial Port-MSSP). El puerto EUSART del PIC18F4550 se conectó al puerto UART del XBee-PRO (S2). Las terminales RX1 y TX1 del EUSART se conectaron, respectivamente, a las terminales UART\_TX y UART\_RX del UART. El puerto USB del microcontrolador de este módulo se conectó al puerto USB de la computadora donde reside la interface de usuario.

La programación que se ejecuta en el PIC18F4550 realiza las siguientes tareas: inicializa el puerto EUSART, inicializa el puerto USB, inicializa el temporizador 1 (para generar el baud rate del EUSART) y a continuación entra a un ciclo donde espera, por el puerto USB, la orden de detección de WiFi enviada por la interface de usuario y transmitirla a cada módulo de detección. Finalmente, espera la respuesta de la orden en el puerto EUSART para entregarla a la interface de usuario. La información contenida en la respuesta es el identificador, nombre y nivel de la señal del punto de acceso y el número de serie del transceptor ZigBee del módulo de detección. En la figura 8 se indica el diagrama de flujo usado realizar la programación del PIC18F4550 la cual se implantó usando lenguaje mikroC PRO FOR PIC.

### **La interface de usuario**

La interface de usuario se realizó en lenguaje Visual C++. La interface solicita cada 30 segundos al módulo supervisor enviar la orden de detección a cada módulo. Este periodo de tiempo es configurable. A continuación, espera que los módulos de detección transmitan el nombre de las redes WiFi detectadas por su correspondiente circuito ESP8266. La interface realiza adicionalmente las siguientes tareas: permite al usuario almacenar en un archivo el nombre de los puntos de acceso autorizados, muestra en pantalla el nombre los puntos de acceso detectados no autorizados, el identificador del módulo que la detectó y la

fecha y hora de detección, y registra además esta información histórica en un archivo de texto. El propósito de este archivo es que su contenido pueda ser usado por herramientas de monitoreo y auditoría del centro de datos. En la figura 9 se muestra la ventana principal de la interface de usuario donde indica la información de redes detectadas no autorizadas.

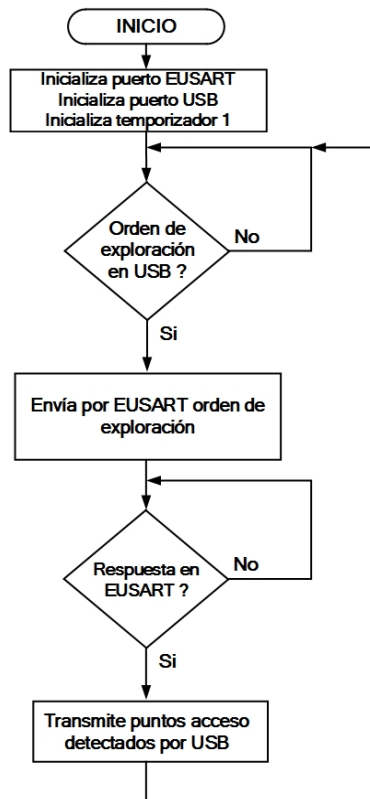


Figura 8 Diagrama de flujo de la programación del módulo supervisor.



Figura 9 Interface de usuario del sistema.

### **3. Resultados**

La elección del circuito ESP8266, permitió la construcción de un sistema sencillo, compacto y fácil de instalar. El centro de datos donde se instaló y probó el sistema está dividido en zonas llamadas bunkers. Los cinco módulos de detección WiFi se ubicaron en diferentes puntos de un bunker y realizaron dos conjuntos de pruebas: uno para medir el alcance del circuito ESP8266 y otro para medir el alcance de los transceptores ZigBee. En el primer conjunto de pruebas se instalaron diez routers WiFi adicionales a los ya existentes en el bunker. Estos routers no se registraron como autorizados en la interface de usuario y se ubicaron a diferentes distancias de los módulos de detección. El resultado obtenido fue que cada módulo detectó los puntos de acceso que estuvieron a distancia menor o igual a 50 metros de él. Los diez puntos de acceso no autorizados se mostraron en la interface de usuario. Algunos puntos de acceso fueron detectados por uno o varios módulos y otros puntos por otros módulos. Esto se comprobó conectando el puerto USB de una computadora portátil al puerto UART0 del circuito ESP8266 de cada módulo de detección (figura 10), para enviarle por medio del programa hyperterminal, el comando AT+CWLAP para determinar los puntos de acceso que detecta cada módulo. En la Fig. 10 se muestra en la ventana de hyperterminal el resultado del comando AT+CWLAP entregado por el circuito ESP8266 de dos módulos de detección. Puede notarse que cada módulo detecta puntos de acceso que están a su alcance y la información de cada punto de acceso (identificador, nombre y nivel de la señal). El alcance de 50 metros se determinó usando esta conexión y moviendo los módulos de detección con respecto al router del punto de acceso. Para el bunker donde se hicieron las pruebas, son necesarios al menos cinco módulos para cubrir el área del bunker (500 m<sup>2</sup>) y detectar todos puntos de acceso. En lo que respecta a la distancia entre los módulos de detección y el módulo supervisor, el resultado del segundo conjunto de pruebas consistió en variar la distancia de un módulo de detección respecto a la oficina de control y monitoreo. El resultado obtenido fue que el alcance del módulo de detección es de 95 metros aproximadamente con línea de vista. Esta distancia es un poco mayor a los 75 metros solicitados en el diseño del sistema.

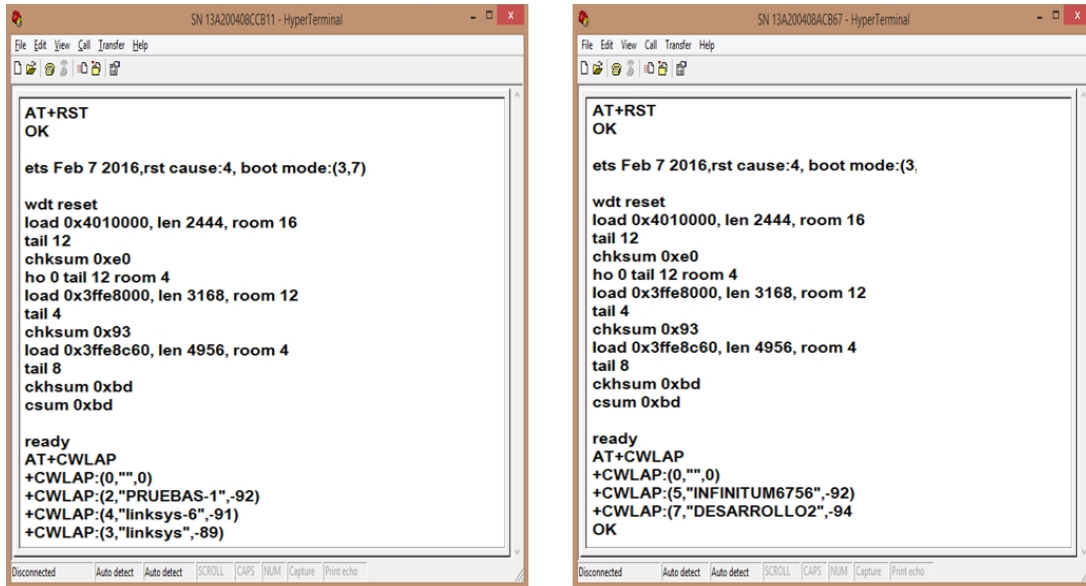


Figura 10 Conexión al circuito ESP8266 de dos módulos de detección.

## 4. Discusión

A pesar de que la función del sistema construido es sencilla, fue desarrollado para satisfacer una necesidad real, destacando que el sistema debe ser confiable. Es un sistema que está en operación, no es un prototipo de laboratorio y puede servir para mantener y crecer la relación de investigación con la industria. El diseño del sistema se realizó considerando también su escalabilidad. Esto es, se pueden adicionar funciones al trabajo desarrollado sin modificar el hardware de los módulos. Por ejemplo, la interface de usuario puede determinar y graficar la ubicación aproximada de un hotspot por triangulación, sabiendo donde están localizados los módulos que han detectado la red WiFi. Si la distancia entre la oficina de control y monitoreo y el bunker más lejano es mayor a 95 metros basta con adicionar al menos un módulo de detección ya que el transceptor ZigBee de estos módulos está configurado como router siendo parte de una red de malla y repitiendo tramas enviadas por otros transceptores. En el trabajo desarrollado solo se usó una función del circuito ESP8266 y quedan aún por aun las restantes, pero si no se utilizara este circuito en el diseño, el sistema resultante sería más grande y complejo. Es importante considerar el alcance de cada módulo de detección, ya que esto indicará la cantidad de módulos necesarios para cubrir el área de trabajo.

## 5. Conclusiones

Se obtuvo como resultado un sistema que detecta puntos de acceso ubicados a una distancia máxima de 50 metros y transmite su identificador, nombre y nivel de señal de RF, por medio de un transceptor ZigBee a una interface de usuario ubicada a una distancia máxima de 95 metros. Una mejora al sistema construido es eliminar el microcontrolador del módulo de detección y usar la CPU del circuito ESP8266. Esto implica usar el kit de desarrollo del circuito ESP8266 para programar la CPU e implantar una aplicación como sería un servidor web. Con esto, el módulo de detección podría conectarse a la interface de usuario ubicada en cualquier punto de la Internet. O bien, otra mejora sería que el microcontrolador de los módulos de detección envíe la información de puntos de acceso a través de la Internet usando el circuito ESP8266 configurado como punto de acceso. Independientemente de las mejoras que sea necesario realizar al sistema, todas indicarán que lo único a modificar será la programación del microcontrolador y/o del circuito ESP8266, lo cual es relativamente sencillo aun sin conocer a detalle el ESP8266, basta que se tenga experiencia en el uso de los conocidos módulos Bluetooth HC-06 y HC-05 usados en muchos sistemas de comunicación cuya configuración es similar al ESP8266. Ambas tecnologías de comunicación son inalámbricas pero una ventaja del módulo ESP8266 es que contiene la pila de protocolos TCP/IP que permite realizar sistemas de control y monitoreo con mayor alcance y ancho de banda accediendo a redes WiFi las cuales pueden encontrarse en muchos lugares de trabajo. Otro trabajo a futuro es usar el circuito ESP8266 con una antena externa lo cual proporcionará mayor alcance a los módulos de detección WiFi.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] L. K. Raju, R. Nair, "Secure Hotspot a novel approach to secure public Wi-Fi hotspot". 2015 International Conference on Control Communication & Computing India (ICCC). Trivandrum. 19-21 Nov. 2015. Pp. 642-646.
- [2] D. Ding, A. J. Torres, F. G. Pikus, "High performance lithographic hotspot detection using hierarchically refined machine learning". 16th Asia and

- South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2011). Yokohama. 25-28 Jan. 2011. Pp. 775-780.
- [3] S. R. Talpur, S. Abdalla, T. Kechadi, "Towards middleware security framework for next generation data centers connectivity". 2015 Science and Information Conference (SAI). London. 28-30 July. 2015. Pp. 1277-1283.
- [4] G. Vanderhulst, L. Trappeniers, "Public WiFi hotspots at your service". 2012 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops). Lugano. 19-23 March. 2012. Pp. 411-414.
- [5] M. Seufert, T. Griepentrog, V. Burger, "A Simple WiFi Hotspot Model for Cities". IEEE Communications Letters. Volume 20. Issue 2. 2015. Pp. 384-387.
- [6] M. A. Ertürk, L. Vollero, M. A. Aydin, "A framework for modeling and implementing QoS-aware load balancing solutions in WiFi hotspots". 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). Barcelona. 26-29 Aug. 2014. Pp. 33-38.
- [7] J. Manweiler, N. Santhapuri, R. R. Choudhury, "Predicting length of stay at WiFi hotspots". 2013 Proceedings IEEE INFOCOM. Turin. 14-19 April 2013. Pp 3102-3110.
- [8] J. Choi, K. G. Shin, "Out-of-band sensing with ZigBee for dynamic channel assignment in on-the-move hotspots". 2011 19th IEEE International Conference on Network Protocols. Vancouver. 17-20 Oct. 2011. Pp. 216-225.
- [9] L. Qiu, H. Rui, A. Whinston, "When Cellular Capacity Meets WiFi Hotspots: A Smart Auction System for Mobile Data Offloading". 2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Kauai. 5-8 Jan. 2015. Pp. 4898-4907.
- [10] N. K. Walia, P. Kalra, D. Mehrotra, "An IOT by information retrieval approach: Smart lights controlled using WiFi". 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence). Noida. 14-15 Jan. 2015. Pp. 708-712.

- [11] Y. P. Zhang, T. Liu, Z. X. Yang, "Design of remote control plug". 2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD). Shanghai. 20-23 Nov. 2015. Pp. 29-30.
- [12] Q. M. Ashraf, M. I. Yusoff, A. A. Azman, "Energy monitoring prototype for Internet of Things: Preliminary results". 2015 IEEE 2nd World Forum on Milan Internet of Things (WF-IoT). Milan. 16-18 Dec. 2015. Pp. 1-5.
- [13] ESP8266EX Datasheet, Version 4.3. Espressif Systems IOT Team. <http://bbs.espressif.com/>. 2015.
- [14] E. Nugroho, A. Sahroni, "ZigBee and wifi network interface on Wireless Sensor Networks". 2014 Makassar International Conference on Electrical Engineering and Informatics (MICEEI). Makassar. 26-30 Nov. 2014. Pp. 54-58.
- [15] J. H. Biddut, N. Islam, R. S. Sultana, "A new approach of ZigBee MAC layer design based on security enhancement". 2015 IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP). Dhaka. 26-28 Dec. 2015. Pp. 1-5.
- [16] R. Akbar, E. Nugroho, "Wireless Sensor Networks for microclimate telemonitoring using ZigBee and WiFi". 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES). Yogyakarta. 13-14 Nov. 2014. Pp. 200-204.

## **7. Autores**

M.C. José Ignacio Vega Luna obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones de microcontroladores, UNIX y sistemas de alta disponibilidad. Desde 1985 es Profesor Titular de carrera en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Mario Alberto Lagos Acosta es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Asociado en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Gerardo Salgado es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Víctor Noé Tapia Vargas es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco, cuenta con el 100% de créditos de la Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores, microcontroladores y robótica. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

M.C. Francisco Javier Sánchez Rangel. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores, microcontroladores y robótica. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.



# IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES EMBEBIDO EN UN FPGA

***José Carlos Delgado Vázquez***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*jc\_04z@hotmail.com*

***Mario Alberto García Martínez***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*gmario55@gmail.com*

***Rubén Posada Gómez***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*pgruben@yahoo.com*

***Ignacio Herrera Aguilar***

Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*nacho.tecorizaba@gmail.com*

## **Resumen**

El este trabajo se presenta el diseño de un sistema embebido para la adquisición y muestreo de imágenes utilizando como plataforma un dispositivo reconfigurable como lo es un FPGA (*Field Programmable Gate Array*), y como sensor una cámara CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*). Además, para la visualización de esta adquisición de imagen se utiliza un monitor con entrada VGA (*Video Graphics Array*).

El área de procesamiento de imágenes se ha desarrollado considerablemente y sus aplicaciones se han visto reflejadas en una diversidad de campos de investigación, incluidas las industriales y las militares. Estas aplicaciones tienen requerimientos importantes tales como velocidad, economía, precisión y una mayor capacidad en el almacenamiento y el procesamiento de las señales.

Se ha usado un FPGA Spartan 6 como procesador dedicado para el diseño del sistema, en el cual; se configura un sensor de imagen CMOS para adquirir imagen en un formato determinado; se realiza el almacenamiento correcto de la imagen y posteriormente es desplegada en un monitor con puerto VGA. La imagen adquirida tiene un tamaño real de 640x480 pixeles.

**Palabra(s) Clave(s):** FPGA, RGB565, SCCB, Sensor de imagen CMOS.

## 1. Introducción

En la actualidad se han explorado diferentes métodos para el procesamiento de imágenes en diversas áreas tales como la medicina, la industria militar, la industria agropecuaria y otras. En [1] y [2] los autores introducen el uso de los FPGA's como procesadores de uso específico para el procesamiento de imágenes en dos áreas diferentes. En [3],[4] y [5] los autores reportan el uso de sensores CMOS para la adquisición de la imagen presentando un amplio estudio de su comportamiento y protocolos de comunicación con el FPGA. Estas aplicaciones demandan prestaciones importantes, sobre todo una mayor velocidad, precisión, almacenamiento, bajo costo y mejor procesamiento de datos como se reporta en [6]. Este procesamiento permite extraer información particular de las imágenes que son adquiridas y tomar decisiones de automatización en diversos entornos de aplicación, para lo cual se hace uso de diferentes tipos de cámaras de visión, las cuales han permitido a la humanidad hacer la vida diaria más cómoda.

Un FPGA (*Field Programmable Gate Array*) es un circuito integrado basado en una matriz de bloques lógicos configurables (combinatoria y/o secuencial), y son reprogramables [7]. La industria microelectrónica ofrece dispositivos de hardware reconfigurable FPGA que permiten módulos de propiedad intelectual (IP) los cuales pueden facilitar la realización híbrida hardware/software de un controlador empotrado [8]. Los FPGA pueden ejecutar diferentes secuencias en paralelo y exceden la potencia de cómputo de los procesadores digitales (DSP) en cada ciclo de reloj [9]. Algunos sistemas de adquisición de imágenes utilizan un FPGA por su alto rendimiento como procesador principal con la finalidad de obtener una mayor calidad de imagen [10]. El sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semi-*

conductor) está compuesto de una matriz de células fotosensibles, la carga la conserva y la traslada directamente al conversor. El sensor CMOS es menos costoso que el sensor CCD. Los sensores CMOS son más usados en las cámaras réflex y las cámaras híbridas (cámaras compactas con objetivos intercambiables) [11]. El sistema propuesto en este trabajo se muestra en la figura 1, y consideramos que la principal aportación de este trabajo consiste en colocar al alcance de todos un controlador de “código abierto” para la interface entre una cámara CMOS y un FPGA, considerando los altos costos de las licencias que los fabricantes particulares requieren para el uso de estos IP-Cores.

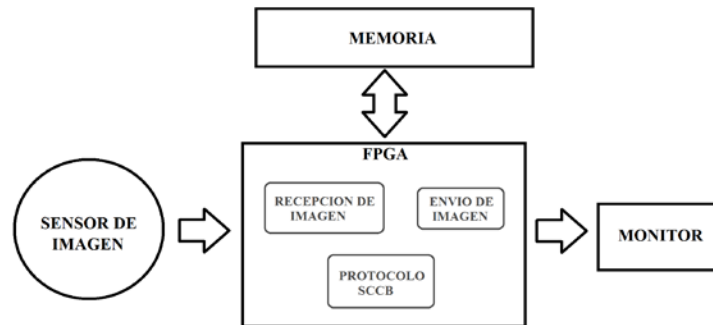


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema de adquisición de imágenes.

Cada uno de los bloques ha sido implementado con el lenguaje VHDL y ha sido sintetizado usando la herramienta ISE-WebPack de Xilinx, la cual es de uso gratuito.

Se pueden apreciar en el diagrama el sensor de imagen, la memoria y el monitor, los cuales son controlados por un FPGA. Este sistema es capaz de configurar el sensor por medio del protocolo SCCB de OMNIVISION, permite adquirir los datos provenientes del sensor los cuales son los pixeles de la imagen, controla una memoria RAM para el almacenamiento y lectura de la imagen guardada y finalmente es capaz de controlar las señales del puerto VGA para mostrar la imagen en un monitor.

## 2. Desarrollo

Para la adquisición de imágenes se utilizó un sensor de imagen CMOS OV7670 de OMNIVISION [12], el cual entrega una imagen de 640X480 pixeles como

máximo y una resolución en intensidad por pixel de 16 bits, se muestra en la figura 2. El sensor es capaz de enviar diferentes formatos de imagen como lo es RGB, YUV, CIF entro otros; sin embargo, para este sistema se eligió el formato RGB, del cual se derivan 4 tipos de resolución de pixeles: Normal RGB, RGB565 (5 bits para color Rojo, 6 bits para el color Verde y 5 bits para el color Azul), RGB555 (5 bits para cada color) y RGB444.



Figura 2 Sensor de imagen OV7670

Como plataforma de hardware se usó una tarjeta prototipo Nexys 3 de Digilent con un FPGA Spartan 6, como se muestra en la figura 3. Además se usó la plataforma ISE de Xilinx para la programación del FPGA usando el lenguaje VHDL para la implementación de todos los bloques del sistema. La memoria para el almacenamiento de la imagen contiene 16 bits de espacio por cada dirección para almacenar los datos [13], es por ello que el formato seleccionado para adquirir los datos de la imagen del sensor y ser almacenados fue RGB565 el cual contiene por cada pixel 16 bits, es decir, que por cada dirección de memoria se almacena un pixel de la imagen a adquirir. Para visualizar la imagen se utiliza un monitor con salida VGA, el cual estará conectado directamente a la tarjeta prototipo del FPGA.

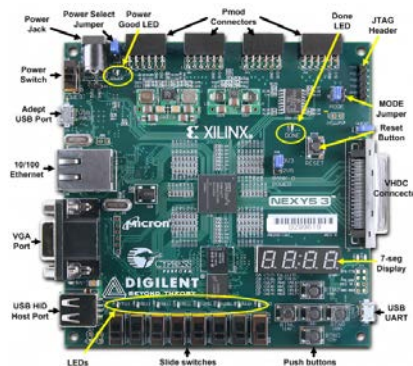


Figura 3 Tarjeta Nexys 3 con Spartan 6.

Para comunicarse con el sensor de imagen, éste cuenta con un numero de dirección como esclavo, el cual es el 0x42, un valor hexadecimal. Los registros a modificar para seleccionar el formato deseado son el registro 0x12 con el dato 0x04 para seleccionar le formato RGB y el registro 0x40 con el dato 0x10 para tener el formato RGB565. El envío de estos datos al sensor de imagen para configurarlo es por medio del protocolo de comunicación SCCB como se había mencionado anteriormente, y el ciclo utilizado para su configuración se muestra en la figura 4, donde se observa que se inicia la comunicación, se manda la dirección de esclavo, el número de registro al que se desea tener acceso y se envía el dato. Por cada dato enviado se espera la señal de reconocimiento y al terminar se finaliza la comunicación.

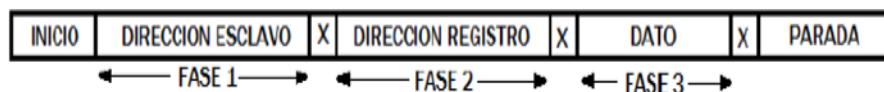
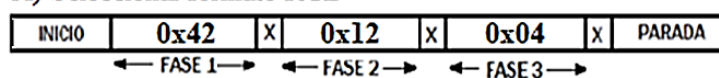


Figura 4 Ciclo de transmisión 3-Fases de escritura Interfaz SCCB.

En la primera configuración del sensor, la cual se muestra en la figura 5a, se hace uso del Ciclo de Transmisión 3 Faces de Escritura del protocolo SCCB. En este ciclo se envía en la primera fase la dirección del esclavo, la cual es 0x42, en la segunda fase se manda el número de registro 0x12 al que se desea tener acceso, en la tercera fase se envía el dato 0x04 para seleccionar el formato RGB.

A) Seleccionar formato RGB



B) Seleccionar formato RGB565

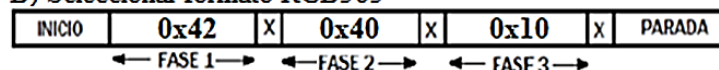


Figura 5 Configuración del sensor de imagen para seleccionar el formato RGB565.

Una vez seleccionado el formato RGB se realiza la segunda configuración para seleccionar el formato RGB565. En la figura 5b, se observan las tres fases para tener un formato RGB565. En la primera fase nuevamente se selecciona la dirección del esclavo 0x42, en la fase dos se envía el registro 0x40 modificando su

valor a 0x10 el cual se muestra en la fase tres. Teniendo ya esta configuración ya es posible adquirir imagen con el formato deseado.

Para una configuración, el sensor de imagen cuenta con dos pines, SDA como entrada y salida de datos y SCL como reloj de entrada para la sincronización de los datos a enviar o recibir.

El bloque completo para la configuración del sensor se muestra en la figura 6, el cual contiene el selector para las diferentes configuraciones, la entrada CLK para la sincronización de las señales, el botón de Reset del sistema, un vector de salida para el dato leído, la señal de salida SCL para la sincronización de los datos y un pin de entrada/salida SDA para la transición de los datos. En la figura 7 se puede observar la simulación del bloque de configuración. Se aprecia en el primer envío de datos la señal de inicio de comunicación, después se observan las señales que envían la dirección del esclavo en modo escritura (0X42). En la señal SDA se observan bits a medio pulso, los cuales representan el tiempo en el que el bloque espera la señal de reconocimiento por parte del sensor del dato que fue enviado. Esta señal de reconocimiento es esperada por cada dato enviado al sensor. Después de enviar la dirección se envía el valor del registro al que se desea acceder y se envía el dato a ingresar al registro ya accedido, finalmente se observa la señal de fin de comunicación.

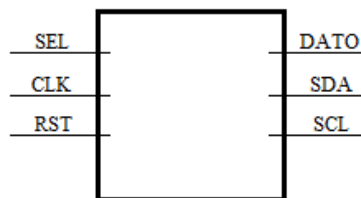


Figura 6 Bloque para la Configuración del sensor.

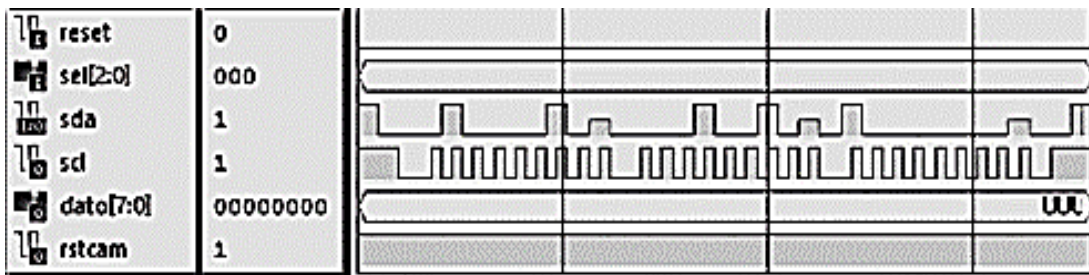


Figura 7 Simulación del ciclo de transmisión de 3 fases de escritura.

El sensor contiene 8 pines de salida para el envío de los datos, es decir, que el sensor de imagen envía datos Byte por Byte. Sin embargo, para el formato deseado RGB565, los pixeles contienen dos bytes, es por ello que se diseñó un bloque para recibir los datos de 8 bits y después unirlos. En la figura 8 se muestra el diagrama de tiempos para el formato RGB565.

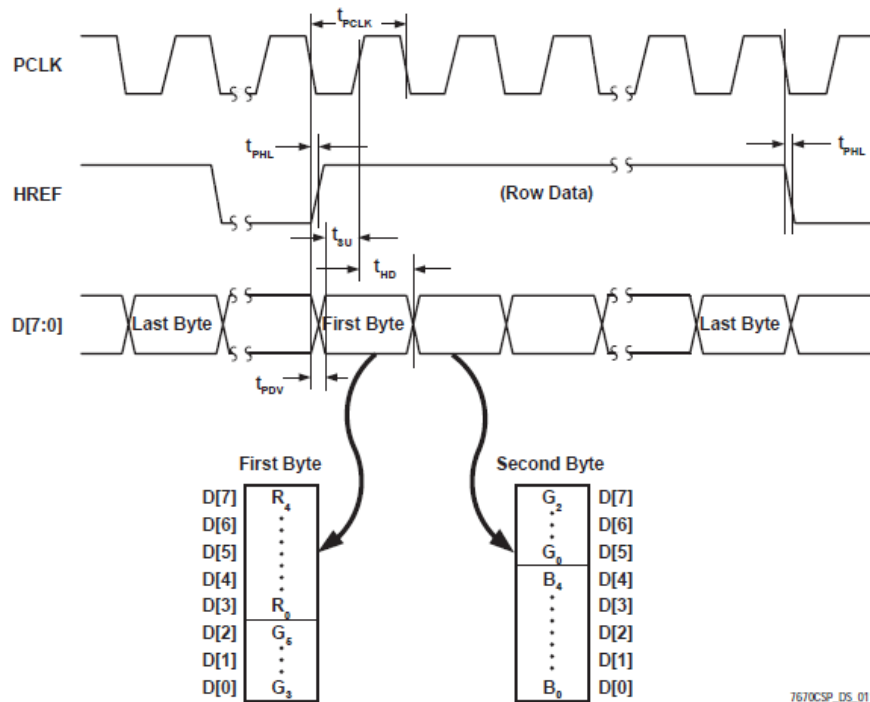


Figura 8 Diagrama de tiempo para el envío de datos para el formato RGB565.

El almacenamiento de la imagen en la memoria se muestra en el diagrama a bloques de la figura 9. El sensor envía datos de 8 bits y para recibir los pixeles completos de 16 bits (formato RGB565), es necesario recibir el primer dato y almacenarlo temporalmente, después leer el segundo dato y unirlo con el primero y finalmente almacenarlo en una dirección de la memoria. Se observa el bloque que recibe los datos provenientes del sensor de imagen, en el cual el primer dato es almacenado en REG8 y cuando llega el segundo dato, éste es enviado con el primero al bloque PIX2BYTE el cual en su salida mandara los pixeles reales. En el bloque de la figura 10, se observa la entrada MCLK para la sincronía de los datos, la señal de Reset, PERMISO como la señal que envía el usuario, IMG\_FIN

que indica que la imagen ha terminado de almacenarse, DIN la cual recibe los datos de la cámara para ser unidos, DOUT la salida de los pixeles de 16 bits, PCLK para la sincronía de los datos a recibir por parte del sensor de imagen, HREF y VSYNC para sincronizar la imagen y finalmente ADDR la cual indica la dirección de la memoria a la que se desea tener acceso para almacenar el pixel.

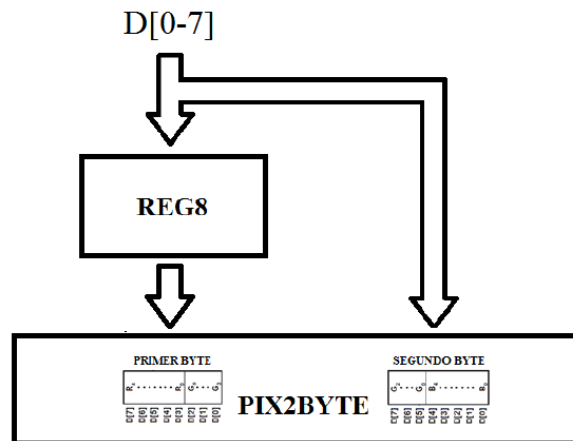


Figura 9 Diagrama a bloques para recibir pixeles.

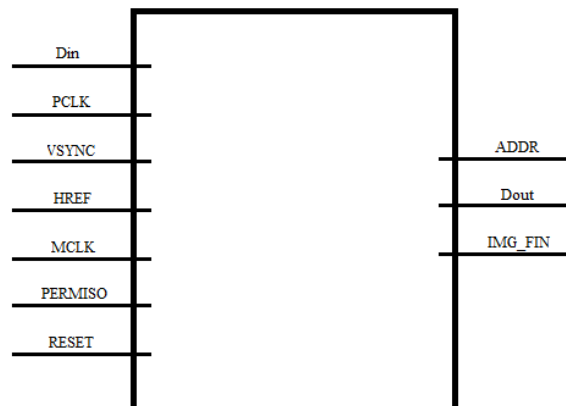


Figura 10 Bloque de recepción y almacenamiento de imagen.

En la figura 11 se presenta la simulación de la recepción y almacenamiento de la imagen. Primero se espera la señal de permiso por parte del usuario. Después se espera que la cámara envíe la señal de VSYNC para indicar que vendrá una nueva imagen, y finalmente se espera la señal de HREF por parte de la cámara indicando que comenzará a enviar los primeros datos de la primera línea de la imagen.



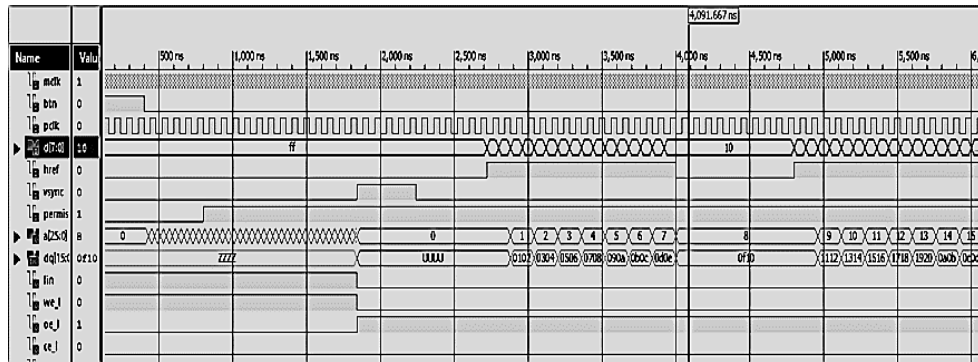


Figura 11 Simulación de recepción y almacenamiento de imagen.

En esta simulación se aprecia que se recibe el primer dato en el primer ciclo de reloj en el instante que HREF cambia su estado de bajo a alto; en el segundo ciclo se recibe el segundo dato, es decir, en dos ciclos ya se tiene el primer pixel completo, en el tercer ciclo se tiene el pixel completo y se manda a una dirección de la memoria, en este caso es la dirección uno.

Para mostrar la imagen por medio del puerto VGA a un monitor, es necesario sincronizar tanto la señal horizontal como la vertical de la imagen, por ello se ha diseñado un bloque como se muestra en la figura 12 con salidas SYNCH Y SYNCV las cuales generan la sincronización de toda la imagen.

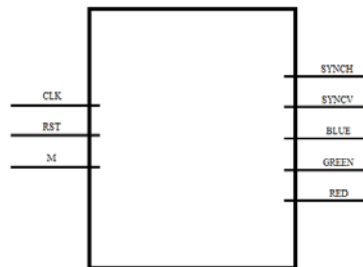


Figura 12 Bloque para envío de imagen a monitor.

Para tener estas señales se utiliza la señal CLK para la sincronía de los mismos, se tiene el puerto RST que permite inicializar las señales a sus valores iniciales. La entrada 'M' está conectada al puerto de entrada y salida de datos de la memoria a utilizar. Las salidas RED, GREEN y BLUE envían por el puerto VGA los valores de los colores de los pixeles de la imagen. Una vez que se ha almacenado la imagen de 640X480 pixeles, es decir, los 307200 pixeles enviada por el sensor, se prosigue a ser mostrada en el monitor.

### 3. Resultados

#### Configuración del sensor

Como se ha mencionado anteriormente la configuración del sensor de imagen se realiza mediante dos líneas de transmisión, SDA y SCL. Es por ello que en este punto se mostrarán los resultados obtenidos de estas dos señales de transmisión de datos.

En la figura 14 se muestra la pantalla de un osciloscopio en la que se presenta una de las configuraciones que se realizan al sensor de imagen, en la cual se observa el envío de la dirección de esclavo con el número 0X42 en valor hexadecimal; después se envía un número de registro y finalmente un dato. También es posible observar que el bit de reconocimiento está en estado bajo, es decir, que el esclavo o en este caso el sensor de imagen ha aceptado el dato que se le ha enviado, por lo tanto la transición de datos continúa hasta que se halla enviado el tercer dato. Analizado este resultado se puede concluir que el sensor ha sido configurado correctamente utilizando el sistema de configuración del sensor.

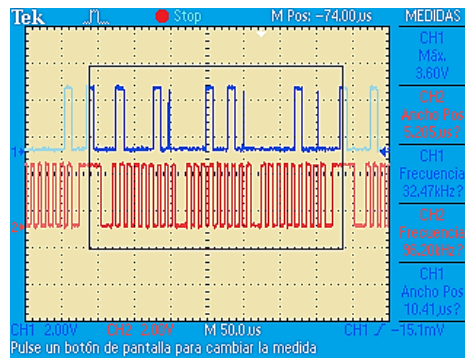


Figura 14 Configuración del sensor.

En las pruebas realizadas a este sistema se realizó el envío de una configuración del sensor con una dirección de esclavo diferente a la que indica la hoja de datos del fabricante. En la figura 15 se muestra el resultado de esta prueba, en la que la dirección enviada es rechazada por el sensor de imagen respondiendo con una señal de NO reconocimiento y por lo tanto terminando la transmisión de datos.

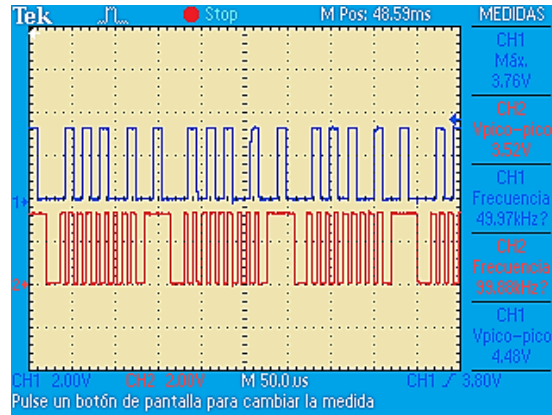


Figura 15 Dirección de esclavo incorrecta rechazada por el sensor de imagen.

La dirección de esclavo enviada es 0X54 en valor hexadecimal. Se observa que el envío de la dirección de esclavo es repetido ya que es una dirección inválida. Se puede concluir de esta prueba que el sistema responde correctamente cuando se envía un dato inválido para el dispositivo esclavo que se desea utilizar.

#### *Almacenamiento y visualización en monitor de la imagen.*

En este punto se muestran en primer lugar los resultados obtenidos del almacenamiento de la imagen en la memoria RAM de la tarjeta NEXYS 3 de DIGILENT. En esta prueba se realizó la adquisición de la imagen de un objeto utilizando el sensor de imagen. Para los resultados de este almacenamiento de la imagen se hace uso de la aplicación ADEPT de DIGILENT para extraer los datos contenidos en la memoria RAM. Los datos serán copiados en un archivo de texto con extensión \*.BIT como se muestra en la figura 16.

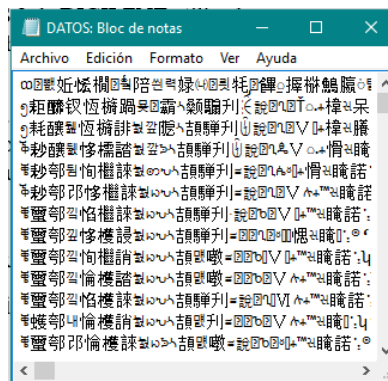


Figura 16 Datos contenidos en la memoria RAM.

Para la comprobación de estos datos del muestreo de la imagen se hace uso de la herramienta MATLAB, la cual es utilizada solo para verificar que los pixeles se están guardando correctamente. En la figura 17 se muestra la imagen en cuatro ventanas interpretada por MATLAB, mostrada en formato RGB y en sus tres capas diferentes.

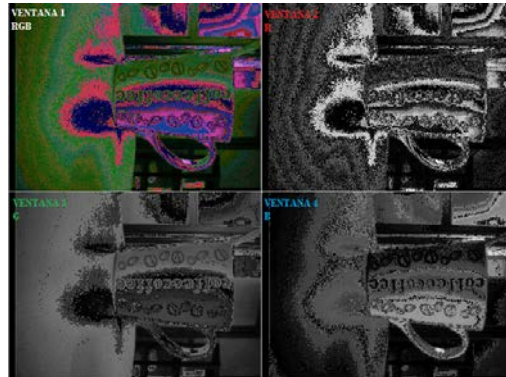


Figura 17 Imagen almacenada en la memoria RAM.

En la ventana 1 se tiene la imagen tomada por el sensor en formato RGB565. En la ventana 2 se tiene la capa de color rojo que compone la imagen, se aprecia que esta capa se encuentra muy distorsionada por lo cual afecta en gran cantidad a la imagen RGB de la ventana 1. En la ventana 3 se tiene la capa del color verde la cual al estar compuesta de parte de un primer dato (RRRRRGGG) y parte de un segundo dato (GGGBBBBB) se puede apreciar partes muy claras. Finalmente en la ventana 4 se tiene la capa azul, la cual se observa toda la imagen parte clara y parte distorsionada.

En la figura 18 se muestra integrado todo el sistema de adquisición de imágenes. Se puede observar la cámara CMOS, la tarjeta NEXYS de DIGILENT con un SPARTAN 6 y el monitor VGA. El objeto para la adquisición es una taza de café.



Figura 18 Sistema integrado.

Por último, en la figura 19 se muestra el resultado final de nuestra implementación. Como puede observarse, ha de quedar para un trabajo posterior la eficiencia en la resolución de la imagen, para lo cual sugerimos se considere revisar el enfoque.



Figura 19 Resultado hasta el momento del sistema de adquisición de imagen.

#### **4. Discusión**

Este sistema de adquisición de imágenes puede ser utilizado para adquirir imágenes de mayor calidad utilizando el sensor de imagen OV4657, el cual ofrece mayores prestaciones de resolución. Este sensor cuenta con la mayoría de los pines utilizados por nuestro sistema, así como el protocolo de comunicación SCCB. La diferencia es que en lugar de recibir 8 bits se puede incrementar a 10 bits, lo cual afecta directamente en la eficiencia de resolución y puede implementarse fácilmente.

Aunque el sistema es capaz de adquirir la imagen correcta que el sensor está enviando, y puede configurar el sensor modificando los registros contenidos en dicho dispositivo, se sugiere tener un mejor enfoque se la cámara, ya que actualmente es uno de los problemas que habrá que resolver en trabajos posteriores.

#### **5. Conclusiones**

Se han presentado en este artículo los resultados de la implementación en FPGA de un sistema de adquisición de imágenes. Se ha desarrollado el software usando la plataforma ISE de Xilinx, y como hardware una tarjeta prototipo Nexys 3 con un FPGA Spartan 6 fabricada por DIGILENT.

Durante el desarrollo de este trabajo se adquirió un aprendizaje más profundo del comportamiento del sensor de imagen utilizado, desde su configuración hasta la adquisición de los datos que éste enviaba. La configuración nos permitió conocer más a fondo el comportamiento del protocolo SCCB

La implementación de la adquisición de la imagen nos ha aportado el conocimiento sobre diversos formatos utilizados en los sensores de imagen, así mismo también nos ha permitido conocer las diferentes formas en que el sensor puede enviar los pixeles de una imagen.

Podemos concluir que con el desarrollo del presente proyecto se logró la configuración correcta del sensor de imagen, el cual para poder comunicarse utiliza el protocolo de comunicación SCCB. Así mismo se logró la adquisición correcta de los datos enviados por el sensor utilizando las señales de sincronización vertical como la horizontal. Una vez que los datos podían ser recibidos correctamente se logró almacenarlos en una memoria RAM para que posteriormente se pudiera mostrar una imagen con los datos de la memoria en un monitor VGA.

Quedará como trabajo posterior, mejorar la eficiencia en la adquisición de la imagen, para lo cual proponemos el uso de un sensor de imagen de alta resolución, como lo es el sensor OV5647 ya que utiliza el mismo protocolo de comunicación SCCB. Además está construido por el mismo fabricante del sensor que se utiliza en este trabajo, es decir, OMNIVISION.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] S. Hazra, S. Ghosh, S. P. Maity, H. Rahaman, "A New FPGA and Programmable SoC Based VLSI Architecture for Histogram Generation of Grayscale Images for Image Processing Applications". *Procedia - Procedia Comput. Sci.* Vol. 93. No. September 2016. Pp. 139–145.
- [2] A. Kumar, P. Rastogi, P. Srivastava, "Design and FPGA Implementation of DWT , Image Text Extraction Technique". *Procedia - Procedia Comput. Sci.* Vol. 57. 2015. Pp. 1015–1025.

- [3] M. G. Lorenz, L. Mengibar-pozo, M. A. Izquierdo-gil, "Sensors and Actuators A: Physical High resolution simultaneous dual liquid level measurement system with CMOS camera and FPGA hardware processor". *Sensors Actuators A. Phys.* Vol. 201. 2013. Pp. 468–476.
- [4] I. Bravo, J. Baliñas, A. Gardel, J. L. Lázaro, F. Espinosa, J. García, "Efficient smart CMOS camera based on FPGAs oriented to embedded image processing" *Sensors*. Vol. 11. No. 3. 2011. Pp. 2282–2303.
- [5] L. Tian, X. Liu, J. Li, and X. Guo, "Image preprocessing of CMOS image acquisition system based on FPGA". *Int. J. Digit. Content Technol. its Appl.* Vol. 6. No. 20. 2012. Pp. 130–139.
- [6] S. Akram, M. Dar, A. Quyoum, "Document Image Processing- A Review". *Int. J. Comput. Appl.* Vol. 10. No. 5. Pp. 35–40.
- [7] E. Monmasson, L. Idkhajine, M. W. Naouar, "FPGA-based Controllers". *IEEE Ind. Electron. Mag.* Vol. 5. No. 1. Mar. 2011. Pp. 14–26.
- [8] A. Cabrera Aldaya, "Controlador empotrado en FPGA para Sistema Inteligente de Transporte". 2011. Pp. 35–44.
- [9] I. U. A. H. Sánchez, *Diseño de IP-Cores para Procesamiento de Imágenes en una Plataforma de Hardware Reconfigurable*. 2014. INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA.
- [10] B. Yan, Y. Sun, F. Ding, H. Yuan, "Design of CMOS Image Acquisition System Based on FPGA". 2011. Pp. 1726–1730.
- [11] Kioskea.net, "El sensor de imágenes". 2014.
- [12] G. Description, A. Information, P. Datasheet, and K. Specifications, OV7670/OV7171 CMOS VGA (640x480) CAMERACHIPTM Sensor with OmniPixel® Technology. Converter. 2004. Pp. 1–32.
- [13] P. Port, "N e x y s 3 T M B o a r d R e f e r e n c e M a n u a l". Vol. 99163. No. 509. 2013. Pp. 1–22.
- [14] OmniVision, *OmniVision Serial Camera Control Bus (SCCB) Functional Specification*, Int. Rectifier, 2003. Pp. 1–24.

- [15] J. C. D. Vazquez, J. J. A. F. Cuautle, "Comunicación serial FPGA Cámara CMOS para lectura y escritura de datos mediante el protocolo SCCB". Vol. 3. 2015. Pp. 191–196.

## **7. Autores**

Ing. José Carlos Delgado Vázquez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Orizaba y actualmente cursa estudios de Maestría en Ing. Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del mismo instituto.

Dr. Mario Alberto García Martínez obtuvo su grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica en el CINVESTAV del IPN y actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Maestría en Ing. Electrónica.

Dr. Rubén Posada Gómez es Doctor en Ingeniería Electrónica por el Institut National Polytechnique de Lorraine, Francia, y actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Maestría en Ing. Electrónica.

Dr. Ignacio Herrera Aguilar obtuvo su grado de Doctor en Ing. Electrónica por la Universidad Paul Sabatier, Toulouse, Francia, y actualmente se desempeña como Profesor-Investigador en el Instituto Tecnológico de Orizaba en la Maestría en Ing. Electrónica



# **SISTEMA SUPERVISORIO DE UNA MICRORED CD BASADO EN COMUNICACIÓN CAN**

***Ernesto Everardo Tovar Zavala***

Instituto Tecnológico de Celaya  
*neto\_omega@hotmail.com*

***Javier Díaz Carmona***

Instituto Tecnológico de Celaya

***Elías Rodríguez Segura***

Instituto Tecnológico de Celaya

***Agustín Ramírez Agundis***

Instituto Tecnológico de Celaya

***Alejandro Espinosa Calderón***

Instituto Tecnológico de Celaya

## **Resumen**

En el presente artículo se describe un sistema que permite supervisar la energía distribuida en una microred CD. Dicha microred forma parte de un proyecto a ser implementado en el Instituto Tecnológico de Celaya. El sistema propuesto permite monitorear el estado actual de celdas fotovoltaicas, bancos de batería y el consumo de energía en cargas. La comunicación a través de los distintos dispositivos que componen la microred se basa en el protocolo de comunicación CAN, el cual permite tener una gran cantidad de nodos, robustez y rapidez en la transmisión de la información. El sistema supervisorio es implementado mediante una interface gráfica en una computadora conectada como nodo a la red CAN, la cual permite visualizar el estado actual en tiempo real de la microred CD.

**Palabra(s) Clave(s):** Control area network, JAVA, harmony, microred, PIC32.

## **1. Introducción**

En la actualidad nuestro planeta se encuentra en una transición en la que los recursos que ésta nos ofrece se están agotando, debido a la alta demanda de consumo de energía.

Como sabemos la mayor parte de la energía que se consume es la energía eléctrica, ya que nos facilita y mejora nuestra calidad de vida. Sin embargo, la mayoría de los métodos para obtener energía eléctrica son a base de combustibles, carbón, petróleo y derivados; los cuales son elementos no renovables, debido a esto llegará el día en que se terminen estos recursos.

Por esta razón se han buscado formas alternativas para la generación de electricidad y de esta manera reducir el consumo de combustibles. Se busca que estas formas alternativas hagan uso de energías renovables, ya que difícilmente estas fuentes se agotaran. Una de las metodologías para utilizar energías renovables es el empleo de lo que se llama microred.

Una microred es una red eléctrica que utiliza fuentes de energía distribuidas, de las cuales la mayoría son renovables además cuenta con sistemas de almacenamiento de energía. Gracias a esta combinación de energías renovables y dispositivos de almacenamiento es posible el suministro de energía con menores fluctuaciones y así cumplir con la demanda en forma local, a su vez se reducen pérdidas de transmisión de energía y se logra que la combinación de estas sea más eficiente.

Una microred cuenta con una gran cantidad de componentes en cada nodo, entre los cuales se puede mencionar: sistemas fotovoltaicos, convertidores, dispositivos de almacenamiento, entre otros. Derivado de lo anterior una microred requiere que exista transferencia de información eficiente, con la finalidad de administrar la transferencia de energía entre cada uno de los nodos y con ello reducir pérdidas.

Hay diversas maneras de supervisar un sistema de control, lo cual se puede llevar a cabo a través de diversos protocolos de comunicación como lo son el HART, Profibus, Fieldbus, Modbus(RS-232), CAN bus, Ethernet entre otros.

En lo que respecta a microredes de CD se ha reportado el uso de Red de Área local (LAN) para la comunicación entre la microred y un gestor de la red de

distribución [1]. Pero el uso de esta técnica puede no estar disponible entre la microred y el sistema de control. Además se requiere de una gran inversión para poder realizarlo.

La transferencia de información a través de la línea eléctrica (PLC) se ha vuelto popular para el control de sistemas eléctricos AC [2]. Un estudio de la viabilidad de PLC para sistemas DC de bajo voltaje es reportado en [3]. Sin embargo, en [4] se dice que la transmisión de datos a través de PLC provoca atenuaciones en condiciones de cargas capacitivas y cuando varía el tiempo, resultando en una comunicación indeseada.

Un protocolo de comunicación adecuado para la comunicación en una microred es una red de control de área (CAN, Controller Area Network) [5] [6]. Una manera alternativa de emplear CAN para la operación de control de una microred es propuesto en [7], en donde se muestra el potencial de reducir el costo de comunicación, debido a la alta disponibilidad en aplicaciones comunes de electrónica de potencia.

En [8] se utiliza una comunicación a través del protocolo CAN y RS-485. El RS-485 se emplea utilizando el protocolo MODBUS para supervisar el sistema (Transferir datos relacionados con la generación y consumo de energía). Es mencionado que CAN logra una comunicación rápida, confiable y distribuida. Por otro lado la comunicación por medio de RS-485 es lenta.

El proyecto desarrollado en [9] propone una alternativa para implementar un sistema de seguimiento del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT) basado en la plataforma FPGA para el control de un módulo fotovoltaico, también en el mismo proyecto se tiene la implementación de los protocolos CAN y SPI usando diferentes plataformas de desarrollo así como lenguajes de programación como VHDL, C++ y ensamblador.

En [10] se desarrolla una interface entre PMBUS y CANBUS, para lograr un control a larga distancia en redes inteligentes de CD.

En el instituto tecnológico de Celaya se tiene proyectado implementar una microred de corriente directa para el suministro de energía eléctrica en las

instalaciones del departamento de Ingeniería Electrónica y de esta manera contar con un laboratorio experimental en el área de energías renovables (figura 1).

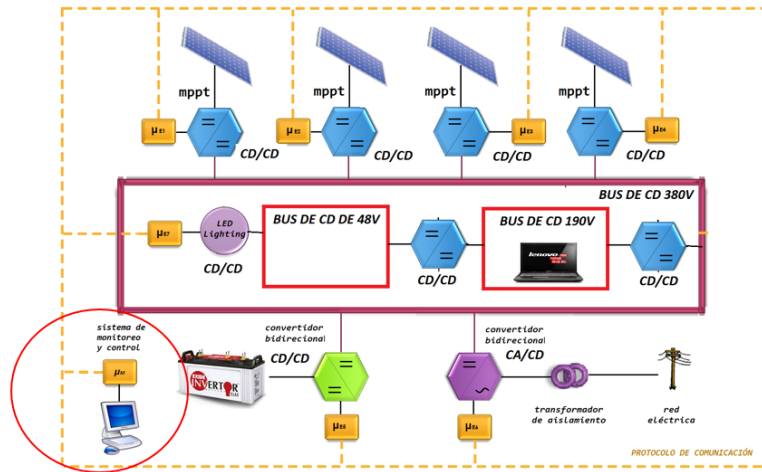


Figura 1 Esquema microred.

La microred CD constará de 40 paneles solares con una capacidad de 250 Watts, los cuales suministrarán energía mediante convertidores CD/CD. Se contará con dos buses de CD uno de 48 Volts y otro de 190 Volts. También habrá un banco de baterías, para en caso de que los paneles no estén generando la suficiente energía éstas entren a cumplir con la demanda de energía. En caso de que los paneles estén generando más energía de la que se está consumiendo, ésta se usará para cargar el banco de baterías. Si por alguna razón tanto los paneles como las baterías no generan la suficiente energía habrá también un convertidor CD a AC bidireccional conectado a la red eléctrica.

Cada uno de los nodos de la microred CD estará interconectada a través del bus CAN. El presente proyecto tiene el objetivo de diseñar e implementar un sistema que supervise el estado de potencia de cada uno de los nodos que componen la microred y en base a la información recibida realizar las acciones pertinentes. Para ello se diseñó un programa en JAVA, con el cual se realiza dicha supervisión mediante una interface USB-CAN basada en un microcontrolador PIC32 de microchip.

En la siguiente sección se definen conceptos relacionados al proyecto y en la tercera sección se describe el sistema propuesto. Los resultados obtenidos al

utilizar el sistema con dos nodos se presentan en la cuarta sección, mientras que la discusión de los mismos se presenta en la última sección.

## **2. Marco teórico**

### **CAN**

CAN es un protocolo de comunicación desarrollado por Robert Bosch en 1968, [11], el cual es un sistema de red de alta velocidad, alcanzando velocidades de transmisión de hasta 1Mbit/s. Los nodos del bus no tienen direcciones específicas ya que en lugar de direccionar la información, se etiquetan los mensajes transmitidos con un identificador, el cual determina la prioridad del mensaje e informa su contenido.

CAN cuenta con varias características como lo es jerarquía de nodos multimaestros, Técnica de acceso CSMA/CD, comunicación de evento impulsado, difusión, respuesta de solicitud remota entre otras. Gracias a estas características CAN proporciona sofisticados mecanismos de detección y tratamiento de errores, así como alta inmunidad a las interferencias electromagnéticas.

CAN cuenta con dos estándares diferentes estándar (CAN 2.0A) y extendido (CAN 2.0B), cuya principal diferencia radica en la longitud del identificador: 11 bits para CAN 2.0A y 29 bits para CAN 2.0B. En comparación con otros protocolos de comunicación serial como lo es el RS 232, CAN puede transmitir datos a altas velocidades y distancias considerables (50 kbits por segundo a 10 km).

Cada mensaje de CAN consiste en un cierto número de bits que son divididos en campos. El significado de estos campos es el ilustrado en la figura 2:

- Bit de inicio = 1 bit = bajo. Marca el inicio de un mensaje.
- Identificador = 11 bits. Dirección lógica y prioridad del mensaje; entre más bajo el valor más alta es la prioridad (0 = Mayor prioridad).
- Bit RTR = 1 bit. El bit RTR (Remote Transmission Request) es usado por un receptor para pedir a un transmisor remoto que envíe su información.
- Campo de control = 6 bits. El primer bit en el campo de control es el bit IDE (Identifier Extension). Si este bit es transmitido como un 0, esto significa que no hay más bits identificadores para enviar (Trama estándar CAN). Bit

r0 es reservado. Los siguientes 4 bits contienen la longitud del dato de los siguientes campos.

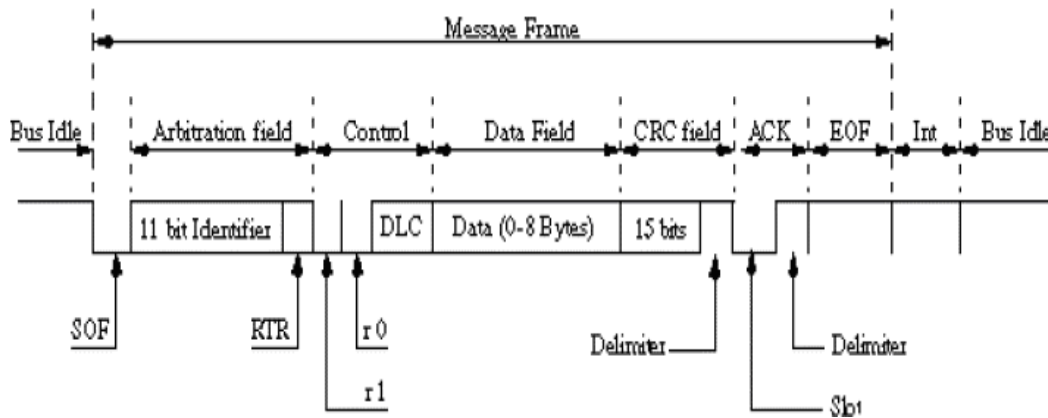


Figura 2 Formato de trama estándar.

- Campo de datos = 0 a 64 bits. Contiene los datos del mensaje de la aplicación.
- Campo CRC = 16 bits. Contiene una suma de comprobación para los bits anteriores del mensaje. La suma de comprobación CRC solo será usada para detección de error.
- Campo ACK = 2 bits. Cada nodo activo en la red que detecte un mensaje correcto en el bus reescribirá el nivel recesivo por un nivel dominante en el campo ACK. Este bit es leído por el transmisor del mensaje. Si lee un nivel recesivo en el campo ACK esto se tratara como un error.
- Campo EOF = 7 bits = Alto. La regla del Bit stuffing es violada cuando el EOF está activo. El EOF marca el final de una trama CAN.
- IFS = 7 bits = Alto. El IFS (InterFrame Space) marca la duración de tiempo necesaria para que el controlador de CAN transfiera una trama correctamente recibida del bus a su correspondiente lugar en el área de almacenamiento de mensajes.
- IDLE = 0 bit = Alto. El bus no es usado.

## Plataforma de desarrollo

Existen diversas plataformas comercialmente disponibles para realizar una interface CAN-USB. Se decidió utilizar en el proyecto la tarjeta PIC32MX5 Starter

Kit basada en el microcontrolador PIC32MX570 de microchip debido a que las prestaciones que ofrece son muy adecuadas al objetivo deseado. Entre las que destacan: 512 kB de flash, 64KB de RAM, USB Dvice/Host/OTG, CAN 2.0B, canales ADC, transceiver de alta velocidad.

En cuanto al desarrollo del software se realizó con la herramienta llamada Harmony, la cual cuenta con un conjunto de librerías cubriendo diversos protocolos (CAN, USB, I2C, Bluetooth, SPI, USART, TCP/IP entre otros).

Harmony MPLAB es una plataforma flexible, abstracta, y totalmente integrada para desarrollo de firmware para microcontroladores PIC32. Toma elementos clave del diseño modular y orientado a objetos, añade la flexibilidad de utilizar un sistema operativo en tiempo real (RTOS) o trabajar sin él, y proporciona un marco de módulos de software que son fáciles de utilizar, configurable para las necesidades específicas, y que trabajan juntos en completa armonía. Harmony MPLAB incluye un conjunto de bibliotecas periféricas, drivers y los servicios del sistema que son de fácil acceso para el desarrollo de aplicaciones. El formato de desarrollo de código permite la máxima reutilización y reduce el tiempo de comercialización [12]. De esta manera es más fácil conjuntar ambos protocolos CAN y USB en un solo dispositivo microcontrolador. Al utilizar Harmony y dar de alta las librerías de CAN y USB permite configurar dichos protocolos en USB: Taza de transferencia, cantidad de datos, modos de transferencia (CDC, HID, BULK), número de endpoints, el vendor y product. Por parte de CAN permite configurar el Baud rate, tramas de datos, tramas remotas, cantidad de datos, protocolo standart o extendido, identificadores, máscaras y filtros.

Harmony utiliza el método de estados y subrutinas en su programación. De este modo es más cómodo para el programador visualizar donde puede haber un error, debido a que todo está estructurado. La manera en que Harmony maneja los cambios de estado es el siguiente: Primero se declara el estado donde se iniciará el programa por default. Cuando se inicia el programa éste empieza a hacer lo que se encuentra en el estado inicial. Al final de cada estado se encuentra una línea en la que se indica cual será el estado siguiente. Si por alguna razón no hay un estado siguiente, el programa se mantiene en el estado actual repitiendo su rutina.

## **Java**

La interfaz gráfica y la transferencia de datos se implementó mediante la plataforma JAVA versión 1.8.0\_51-b16 utilizando el entorno de desarrollo eclipse mars 2 versión 4.5.2. La transferencia de datos entre computadora y tarjeta se realizó mediante la librería usb4java con la cual es posible el acceso a dispositivos USB.

Java es la base para prácticamente todos los tipos de aplicaciones de red, además del estándar global para desarrollar y distribuir aplicaciones móviles y embebidas, juegos, contenido basado en web y software de empresa.

Java ha sido probado, ajustado y ampliado por toda una comunidad de desarrolladores, arquitectos de aplicaciones y entusiastas de Java. Además está diseñado para permitir el desarrollo de aplicaciones portátiles de elevado rendimiento, para el más amplio rango de plataformas informáticas posible. Así mismo, al poner a disposición de todo el mundo aplicaciones en entornos heterogéneos, las empresas pueden proporcionar más servicios y mejorar la productividad, las comunicaciones, la colaboración del usuario final y reducir drásticamente el costo de propiedad tanto para aplicaciones de usuario como de empresa [13].

## **3. Desarrollo propuesto**

Lo que se propone es el desarrollo e implementación de un sistema supervisorio para una microred de corriente directa. La supervisión de los distintos módulos se realizará en tiempo real a través del protocolo de comunicación CAN.

Los diversos dispositivos que componen la microred contarán con un módulo CAN, para de esta manera lograr la transferencia de datos de manera robusta a través de los nodos CAN. Sin embargo, es indispensable contar con un sistema de supervisión que permita monitorear en tiempo real la potencia disponible o consumida en cada uno de los nodos de la microred.

Por tales motivos la propuesta del sistema supervisorio consta de una interface de usuario gráfica diseñada en JAVA e implementada en una computadora que forma parte de la red CAN. La comunicación se realiza mediante una interface



CAN/USB, para de esta manera poder visualizar y supervisar lo que ocurre en los diversos nodos de la microred (figura 3).

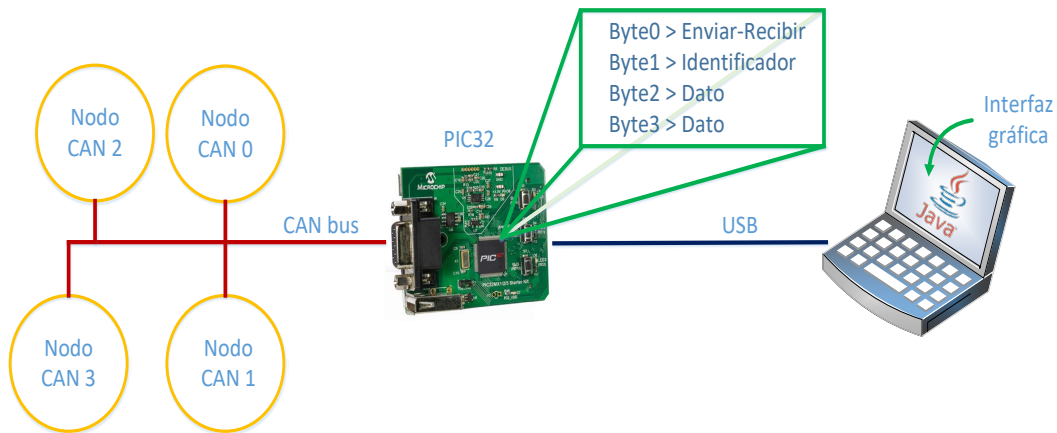


Figura 3 Esquema de sistema propuesto.

### Programa tarjeta PIC32

En nuestro caso se configuró el USB en modo de transferencia BULK con una tasa de transferencia de 64 bytes. Para ajustar el tiempo de bit se realizaron los cálculos mostrados en las ecuaciones 1 y 2.

$$T_{BTL} = T_{XOSC} / (2 * (BRP + 1)) \quad (1)$$

$$Bit\ rate = (T_{BTL} / (SJW + PRSEG + SEG1PH + SEG2PH)) \quad (2)$$

$$SJW = 1, PRSEG = 1, SEG1PH = 3, SEG2PH = 3, BRP = 2, T_{XOSC} = 48MHz$$

$$T_{BTL} = \frac{48MHz}{2 * (2 + 1)} = \frac{48MHz}{6} = 8MHz$$

$$Bit\ rate = \left( \frac{8MHz}{1 + 1 + 3 + 3} \right) = \left( \frac{8MHz}{8} \right) = 1Mbps$$

El protocolo CAN funciona de la siguiente manera en la tarjeta: primero se requiere habilitar el modulo CAN para después configurarlo. Para que funcione correctamente se asigna una memoria RAM la cual almacena los mensajes que serán enviados o recibidos. El tamaño de esta depende de la cantidad de canales y el tamaño de los datos. En nuestro caso se configuró para dos canales, uno de transmisión y otro de recepción, de 10 datos ocupando un total de 320 de RAM.

En el buffer de recepción se tienen almacenados los mensajes leídos por el módulo CAN, el cual cuenta con una máscara permitiendo pasar los identificadores del 0 al 3. El diagrama a bloques del software de CAN se muestra en figura 4.

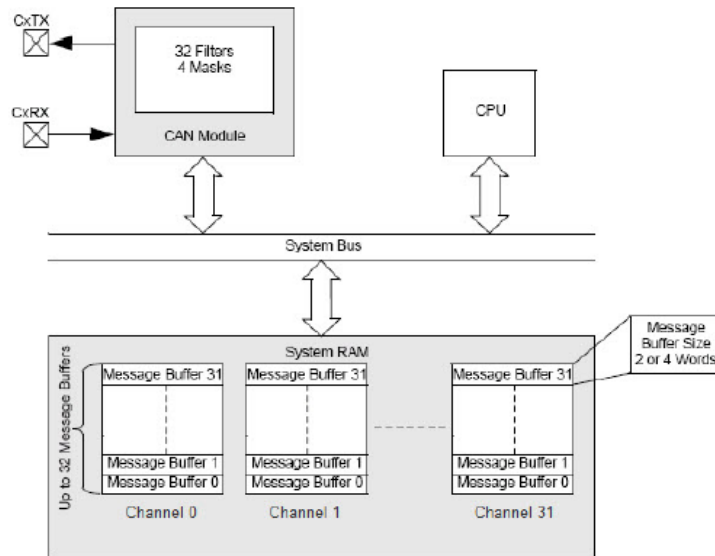


Figura 4 Diagrama de bloques software CAN.

Para acceder a los mensajes de CAN se hace uso de la instrucción `DRV_CAN0_ChannelMessageReceive` la cual tiene como argumentos el canal, el identificador del mensaje deseado, el tamaño del dato y la variable donde será almacenado el mensaje.

En el programa principal se cuenta con 3 estados: estado inicial, espera de configuración USB y estado de tareas principales (ver figura 6). El algoritmo general es el siguiente: De la aplicación en la computadora se envía un primer byte, denominado `byte0`, que representara si se quiere enviar o recibir un mensaje vía CAN. Como segundo byte se envía el identificador del nodo CAN y un tercer byte, que en el caso de que se envíe un mensaje esté representa la acción que se quiere que realice el nodo; en caso de que se quiera recibir un dato habrá un cuarto byte, éste y el tercero representan la lectura de voltaje o corriente del nodo. Para poder apreciar el algoritmo completo observar el diagrama de flujo descrito en figura 5.

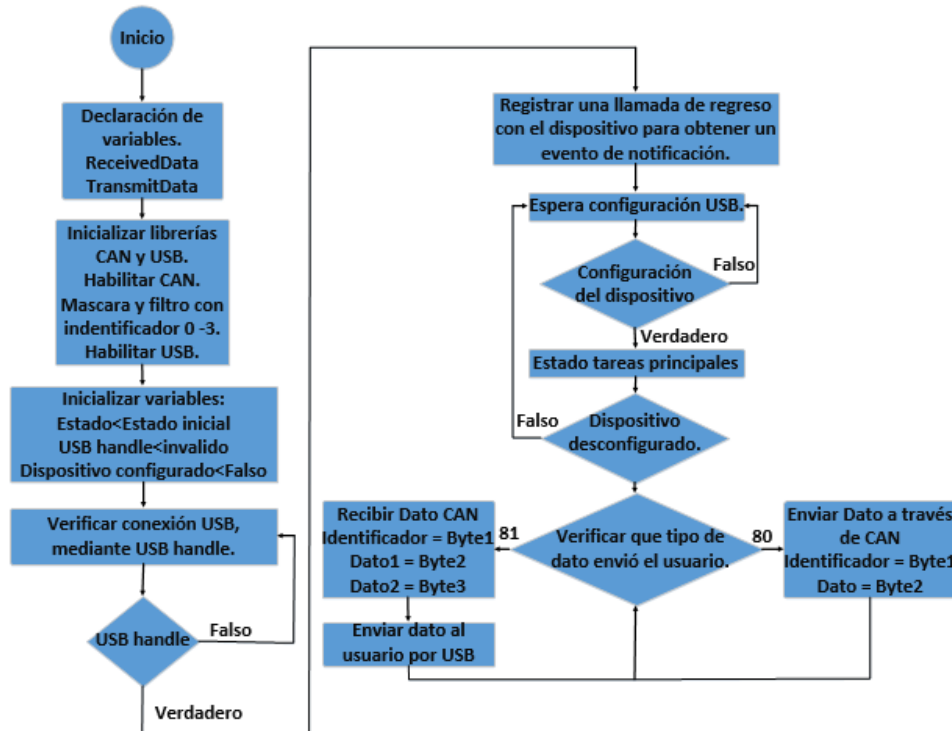


Figura 5 Diagrama de flujo programa de PIC32.

## Programa en Java

Lo que se busca con esta interfaz es generar un ambiente de supervisión amigable, de tal manera que se pueda observar lo que ocurre en la microred a través del protocolo CAN y tomar acciones en base al estado de cada uno de los nodos.

La comunicación PC-PIC32 mediante USB se estableció por medio de la librería `usb4java`, la cual es un conjunto de archivos `.jar` que permiten tener una comunicación con diversos dispositivos USB. Para la aplicación deseada se utiliza para enviar y recibir datos de manera BULK al microcontrolador.

Lo primero que realiza el programa es declarar las variables del *product* y *vendor id* del microcontrolador y los *endpoints* de lectura y de envío, que en nuestro caso el de lectura es el `0x81` y el de envío `0x01`. El uso de estas variables hace posible realizar un listado todos los dispositivos USB conectados mediante la instrucción *findDevice*, y con lo cual obtener el descriptor del dispositivo USB de la tarjeta PIC32. Después de se obtiene el descriptor, se realiza una serie de pasos para

obtener su *Handle*, establecer los *endpoints* del dispositivo USB y activar una bandera que indica que la comunicación con el microcontrolador fue un éxito. Una vez establecida la comunicación es posible hacer uso de la instrucción *LibUsb.bulkTransfer(device handle, endpoint, buffer, transfered, timeout)*; la cual dependiendo del *endpoint* asociado envía o recibe un dato del tamaño dado por *transfered* y siendo el dato el buffer. Por ejemplo para enviar un dato se usaría el *endpoint* 0x01 y para recibir el 0x81. Definido esto ya es posible tanto enviar como recibir datos desde el microcontrolador PIC32, lo siguiente es diseñar la aplicación.

La interfaz cuenta con información de los nodos principales; esta información va desde el estado de los paneles solares, la cantidad de carga en las baterías, el consumo y generación de energía en la microrred. Este modo es el inicial y cuenta con las opciones de agregar o eliminar nodos (figura 6).

Para la administración de los nodos se utilizó un archivo de texto. Al seleccionar la opción agregar nodo (figura 7) se abrirá la ventana agregar nodo (figura 8) en la cual se pide ingresar el identificador del nuevo nodo así como un nombre con el cual se identificará.

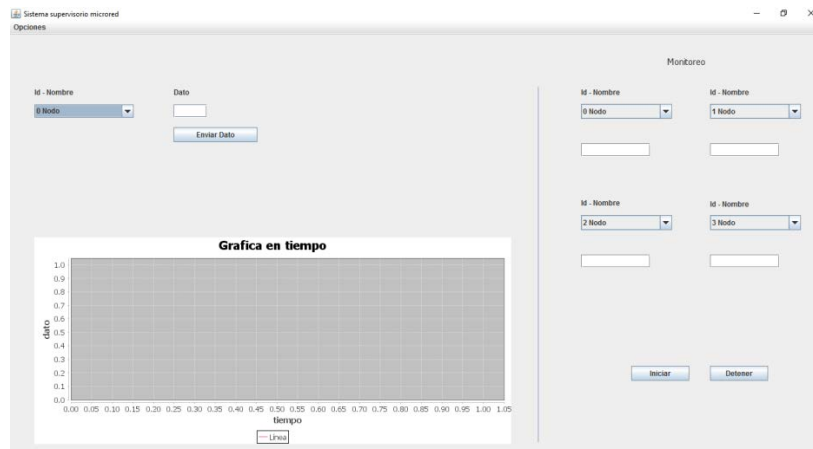


Figura 6 Aplicación sistema supervisorio.

De la misma manera al seleccionar la opción eliminar nodo se abrirá una nueva ventana donde en un *comboBox* se encontrará la lista de los nodos existentes. Se selecciona uno y después se presiona el botón eliminar (ver figura 8).

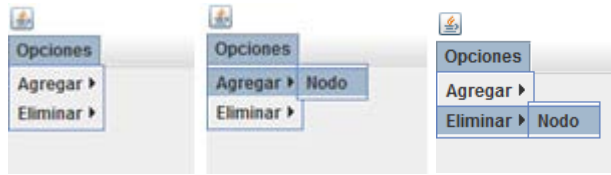


Figura 7 Opciones.

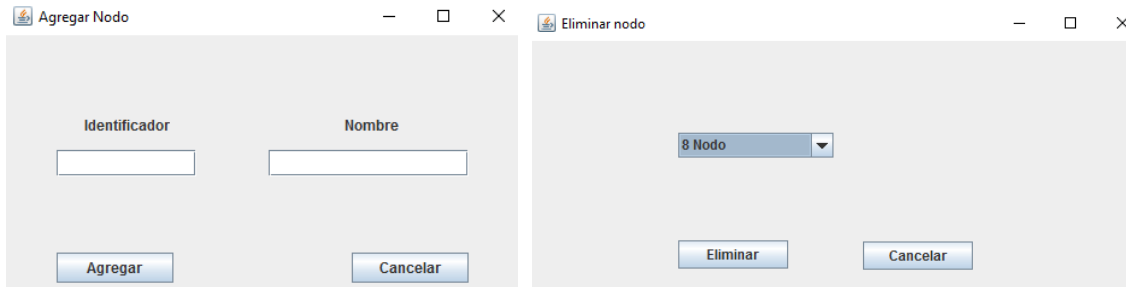


Figura 8 Ventana agregar y ventana eliminar.

La ventana principal se puede dividir en 3 áreas principales: una para enviar un dato a un nodo determinado, una área donde se muestra la lectura de voltaje de 4 nodos diferentes y una área donde se grafican estos voltajes. El objetivo de poder enviar un dato a un nodo específico, es para obtener un control manual de ese nodo y de esta manera tomar la decisión de apagarlo o encenderlo (figura 9).

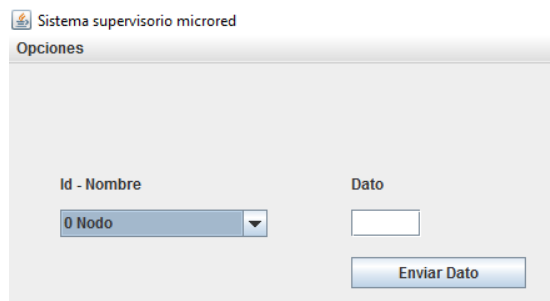


Figura 9 Sección enviar dato.

La segunda sección es la de monitoreo en tiempo real (figura 10). Primero se seleccionan los nodos de los cuales requerimos su información. Al presionar el botón iniciar se inicializaran dos hilos en JAVA los cuales se ejecutan paralelamente. Uno se encarga del envío y lectura de los 4 distintos nodos a

través de USB/CAN. El otro se encarga de realizar lecturas de los 4 nodos, mostrando el comportamiento de voltaje de los nodos (figura 10).

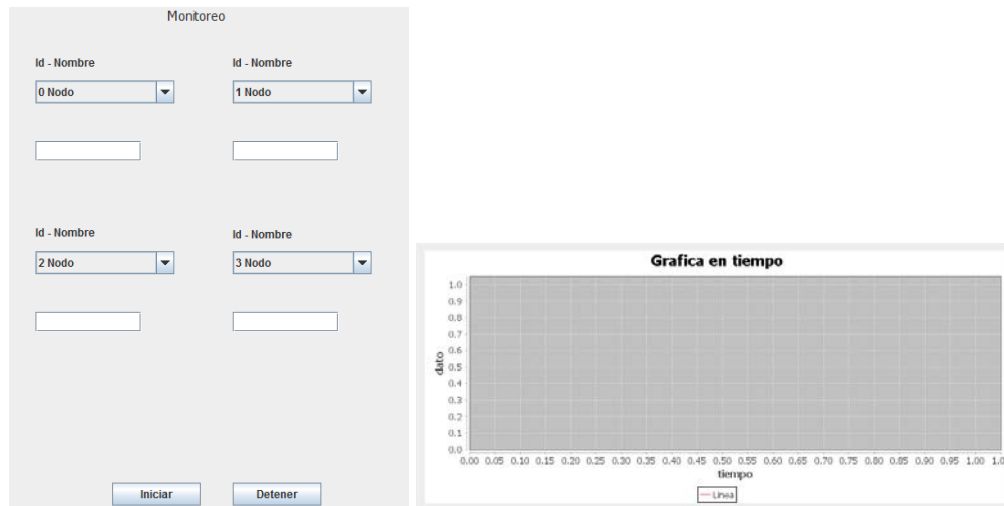


Figura 10 Monitoreo y gráfica de voltajes.

La gráfica se genera utilizando la librería *jfreechart* que al igual que *usb4java* es un archivo tipo *jar*. Dependiendo del tipo de gráfico deseado la estructura de su programación cambia.

#### 4. Resultados

En la parte experimental del sistema se utilizó un simulador modular de panel solar de marca Agilent (figura 11), el cual suministra la energía mediante la simulación del comportamiento de un módulo solar. En este caso se configuró para que genere 124.59 V y una corriente de 1.1922 A, ésta energía es suministrada a dos convertidores CD/CD con una ganancia unitaria (figura 12) los cuales forman parte de una microred de CD de dos nodos, conteniendo cada uno de ellos un módulo CAN (uno con identificador 0 y el otro con identificador 3) con un Baud Rate de 1 Mbps.

Estos dos nodos entregan como dato su voltaje de salida. Con la finalidad de probar el sistema diseñado se varió el voltaje generado por el simulador de panel solar. Iniciando con un voltaje de 180 V, subiendo después a 195 V y después bajando a 123 V. Después se apagó el generador el cual disminuye su voltaje

gradualmente hasta llegar a cero. Al final se volvió a encender y se configuro para un voltaje de 126 Volts.



Figura 11 Simulador modular de panel solar.

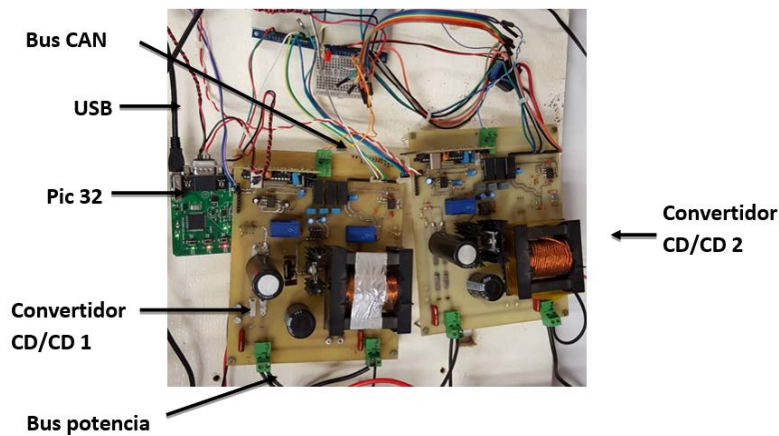


Figura 12 Convertidores conectados a la red CAN.

El voltaje medido a la salida de los convertidores CD/CD fue inicialmente de 195 Volts, a partir del cual éste varió en el rango indicado en la figura 13; con lo cual se verifica el correcto funcionamiento de la comunicación CAN/USB. La línea roja indica el nodo con identificador 0 mientras que la azul el nodo con identificador 3.

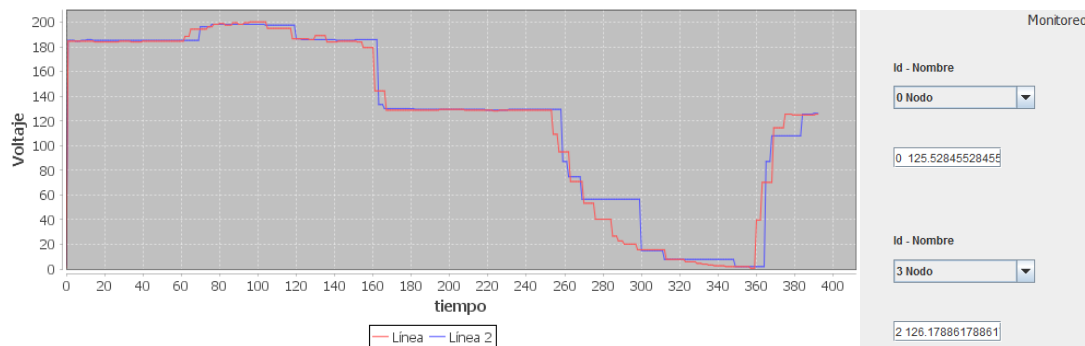


Figura 13 Sistema supervisorio en funcionamiento.

## **5. Discusión**

Los resultados reportados del sistema desarrollado corresponden al comportamiento de voltaje de dos nodos dentro de la microred CD. Pero dicho comportamiento puede ser extrapolado al caso de utilizar un mayor número de nodos. Por otra parte la aplicación desarrollada se probó durante un periodo de tiempo de 18 horas monitoreando de manera correcta el estado de la red. Debido a que ambos convertidores CD/CD son unitarios y que tienen como entrada el mismo voltaje suministrado por el panel solar, idealmente se esperaría que ambos tuviesen un comportamiento de voltaje idéntico. Sin embargo, el sistema supervisorio desarrollado permite observar el comportamiento real de ambos convertidores, los cuales difieren en su respuesta.

Es importante resaltar que esta versión del sistema supervisorio fue puesta a prueba con el monitoreo de valores de voltaje en los dos nodos disponibles. Sin embargo, la medición puede ser realizada sobre valores de corriente e incluso potencia. La razón por la que solo se reporta voltaje es porque esa variable es la disponible en los nodos de los convertidores. El despliegue de información mediante el sistema desarrollado tiene un pequeño retraso, pero éste puede ser reducido mediante el tiempo de muestreo utilizado.

## **6. Conclusiones**

La implementación del protocolo CAN para supervisar el estado de una microred de CD resultó ser una buena opción, ya que al ser el bus de tipo par trenzado la información no se ve afectada por interferencias aparte de que no es muy costoso. Las pruebas experimentales realizadas con dos nodos confirman el correcto funcionamiento del sistema supervisorio. Respecto a la plataforma JAVA ha resultado ser un entorno de programación muy amigable y debido a sus diversas opciones de diseño se puede seguir mejorando el entorno visual para el usuario. Los resultados de las pruebas demostraron que la interfaz CAN/USB es una forma fiable para monitoreo en tiempo real. Ahora que la comunicación ya está establecida, como trabajo futuro queda mejorar aspectos de la aplicación y poder generar un archivo de registro del día a día de la aplicación. Así como poder



implementar el algoritmo de supervisión de la microred ya con más nodos CAN y mejorar los pequeños detalles respecto a la comunicación, mencionados en la discusión.

Particularmente como trabajo futuro a desarrollar es la incorporación de nodos a la microred CD correspondiente a: cargas, bancos de baterías e inversores conectados a la red de distribución AC de CFE, donde cada uno de ellos cuente con una interface CAN con un identificador asignado. Lo anterior permitirá el desarrollo de algoritmos de control que permitan la administración eficiente de la energía disponible. Por ejemplo, un caso podría ser que la energía de los paneles solares sea consumida por una carga de CD y además se cuente con energía remanente. En dicho caso el sistema supervisorio después de sensar la energía disponible en el panel solar y la consumida en carga (ambos como nodos de la red CAN) podría decidir en accionar la carga de un banco de baterías (también conectado como un nodo de la red CAN), o dado el caso que se tengan las baterías en carga completa se podría activar el suministro del sobrante de energía a la red de distribución AC mediante el inversor.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] R.Majumder, G. Ledwich, A. Ghosh, S. Chakrabarti, F. Zare, “Droop control of converter-interfaced microsources in rural distributed generation”. *IEEE Trans. Power Del.* Vol. 25. No. 4. Oct. 2010. Pp. 2768–2778.
- [2] D. Guezgouz, D. E. Chariag, Y. Raingeaud, J.-C. Le Bunetel, “Modeling of electromagnetic interference and PLC transmission for loads shedding in a microgrid”. *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 26. No. 3. Mar. 2011. Pp. 747–754.
- [3] A. Pinomaa, J. Ahola, A. Kosonen, “Power-line communication-based network architecture for LVDC distribution system”. in *Proc. IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Appl.* Apr. 2011. Pp. 358–363.
- [4] T. A. Papadopoulos, G. K. Papagiannis, P. S. Dokopoulos, “Low-voltage distribution line performance evaluation for PLC signal transmission”. *IEEE Trans. Power Del.* Vol. 23. No. 4. Oct. 2008. Pp. 1903–1910.

- [5] Y. Zhang, H. Ma, "Theoretical and experimental investigation of networked control for parallel operation of inverters". *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 59. No. 4. Apr. 2012. Pp. 1961–1970.
- [6] C.-L. Chen, Y. Wang, J.-S. Lai, Y.-S. Lee, D. Martin, "Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications". *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 25. No. 1. Jan. 2010. Pp. 6–15.
- [7] C.-L. Chen, W. Yubin, L. Jih-Sheng, L. Yuang-Shung, D. Martin, "Design of parallel inverters for smooth mode transfer microgrid applications". *IEEE Trans. Power Electron.* Vol. 25. No. 1, Jan. 2010. Pp. 6–15.
- [8] S. S. Thale, R. G. Wandhare, V. Agarwal, "A Novel Reconfigurable Microgrid Architecture With Renewable Energy Sources and Storage". *IEEE Transactions On Industry Applications.* Vol. 51. No. 2. March/April 2015. Pp. 1806–1807.
- [9] A. M. Ramírez Del Ángel, MPPT digital para un conjunto de módulos solares orientado a aplicaciones de micro-redes mediante CAN. Junio 2013. Tesis que para obtener el grado de M.C. en Ing. Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya.
- [10] A. López Arreguín, Control de un sistema de alimentación distribuido basado en pmbus. 2014. Tesis que para obtener el grado de M.C. en Ing. Electrónica, Instituto Tecnológico de Celaya.
- [11] W. Lawrenz, *CAN System Engineering From Theory to Practical Applications.* primera edición. 1997. Ed. Springer-Verlag. New York. Pp. 3–10.
- [12] Harmony. <http://www.microchip.com/mplab/mplab-harmony>. Mayo 2016.
- [13] Java. <https://www.java.com/es/about/>. Mayo 2016.

## **8. Autores**

Ing. Ernesto Everardo Tovar Zavala obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Piedras Negras, y actualmente está cursando la Maestría en Ciencias en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. José Javier Díaz Carmona, obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, posteriormente los títulos de Maestro y Doctor en Ciencias en Electrónica en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, actualmente pertenece al sistema nacional de investigadores nivel 1 y se desempeña como docente e investigador en el departamento de Ing. Electrónica del Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Elías José. Juan Rodríguez Segura: obtuvo en 2003 el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 2003, actualmente es profesor investigador de tiempo completo en el departamento de Ing. Electrónica del Instituto Tecnológico de Celaya.

Dr. Agustín Ramírez Agundis, obtuvo sus títulos de Ingeniero en Eléctrica y Maestro en Ciencias en la Universidad de Guanajuato, y su título de Doctor en Ciencias en Electrónica en la Universidad Politécnica de Valencia España, actualmente se desempeña como docente e investigador en el departamento de Ing. Electrónica del Instituto Tecnológico de Celaya.

Alejandro Espinosa Calderón recibió su título de Doctorado de la Universidad Autónoma de Querétaro, en Querétaro, Qro., Mex., en 2012, de donde fue titulado con honores, también recibió la medalla al mérito académico de la UAQ, y ganó el premio a la mejor tesis doctoral de la facultad de ingeniería de la UAQ. Ha participado en eventos científicos internacionales en EEUA, Italia y China. Ha recibido premios internacionales de la OSA y USAID, ambos de EEUA. Desde 2013 trabaja en el Dpto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Sus áreas de interés incluyen: aplicaciones de instrumentación electrónica y procesamiento en sistemas digitales FPGA/microprocesadores.

# IMPLEMENTACIÓN EN FPGA DE SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA PARA UNA FUTURA PLATAFORMA DE MONITOREO AMBIENTAL

***Julio César Regalado Sánchez***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya  
*11030432@itcelaya.edu.mx*

***Alejandro Espinosa Calderón***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya  
*alejandro.espinosa@itcelaya.edu.mx*

***José Alfredo Padilla Medina***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya  
*alfredo.padilla@itcelaya.edu.mx*

***José Javier Díaz Carmona***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Celaya  
*javier.diaz@itcelaya.edu.mx*

## **Resumen**

Este trabajo presenta los avances en el diseño y desarrollo de lo que será un prototipo de una plataforma de integración de sensores de variables ambientales, basada en FPGA. Se eligió el utilizar FPGAs debido a que éstos destacan por su capacidad de procesamiento paralelo, la portabilidad de su código, y su alta velocidad de trabajo. La plataforma que se describe en este trabajo cuenta con la capacidad de conectar múltiples sensores para mediciones ambientales como son temperatura, humedad y luminosidad. Todos estos sensores utilizan diferentes protocolos digitales de comunicación, por ejemplo: RS232, I2C y SMBus, entre otros. Por el momento se reportan avances específicamente en la implementación del sensor de temperatura y humedad relativa SHT75. Este sensor utiliza un protocolo basado en I2C, pero con algunas variantes. Este artículo reporta la

implementación y ajuste del protocolo de medición, así como algunas mediciones logradas hasta el momento.

Esta plataforma está pensada para ser reconfigurable en hardware, realizar procesamiento paralelo y permitir la integración de nuevos sensores. Parte del trabajo a futuro consistirá en describir e implementar en el FPGA los protocolos de comunicación y procesamiento digital de señales correspondiente a esos nuevos sensores.

**Palabras Clave:** I2C, Medición ambiental, RS232, VHDL.

## 1. Introducción

En la actualidad existen diferentes sistemas de medición de variables ambientales mediante plataformas de integración. Algunas de estas plataformas hacen uso de la tecnología de módulos ZigBee que se utilizan como router en puntos distantes, formando con estos dispositivos una red de sensores que permiten supervisar algunas variables físicas [1]. Algunas otras plataformas utilizan técnicas de control basadas en sistemas de conjuntos difusos las cuales además utilizan una red de internet para poder monitorear los sensores mediante la nube (*Cloud*) a través de una red alámbrica [2]. Existen otras plataformas que hacen uso de los microprocesadores para realizar el monitoreo de temperatura mediante sensores analógicos para facilitar la adquisición de datos mediante las entradas analógicas de los microcontroladores [3]. Algunos otros proyectos desarrollados actualmente combinan la tecnología de módulos ZigBee con módulos de radio frecuencia XBee-PRO que convierten la red alámbrica ZigBee en inalámbrica lo cual contribuye a una mejora a la red [4]. También se han desarrollado tarjetas de adquisición de datos basadas en microcontroladores y software libre, para obtener una tarjeta de bajo costo [5]. Además, se han desarrollado plataformas, basadas en el uso de software y hardware libres, que consideran la construcción y adaptación de sensores para medir las variables climatológicas dentro y fuera invernaderos. Estas plataformas utilizan la construcción y adaptación de interfaces electrónicas para capturar los valores de

los sensores y el desarrollo de software para la interpretación de los datos mediante plataformas de software y hardware libres como Java y Arduino [6]. Las plataformas antes mencionadas tienen la desventaja de que trabajan de forma serial, lo que ocasiona retrasos en el procesamiento. Los FPGA (acrónimo de *Field Programmable Gate Array*) son dispositivos digitales que permiten realizar procesamientos en paralelo, resultando en mayor velocidad de trabajo. Por este motivo se pretende crear una plataforma basada en FPGA, que nos permita conectar diferentes dispositivos y realizar mediciones de manera simultánea, además de tener la posibilidad de expandir la cantidad de sensores integrados, al tener diferentes bloques de programación, con protocolos de comunicación establecidos como I2C, RS232 y protocolos propios de diferentes fabricantes [7]. Al tener los bloques de programación con diferentes protocolos de comunicación, bastará con agregar un nuevo bloque a la estructura y habilitar las entradas y salidas de la FPGA para poder integrar un nuevo dispositivo de medición sin intervenir con los demás bloques de programación de los demás dispositivos [8]. El primer objetivo para lograr esta plataforma es la implementación en FPGA del protocolo RS232, I2C y el protocolo del sensor SHT75, que sentarán las bases para la plataforma de monitoreo ambiental.

## 2. Desarrollo

Para la implementación de la plataforma de integración de sensores, se utilizó una tarjeta Basys 2, la cual cuenta con un reloj interno de 50 MHz, conector VGA, puerto PS/2, 8 led's, 4 display's, 4 botones, 8 switches y 16 pines de I/O. en la figura 1 se muestra la FPGA mencionada [9].

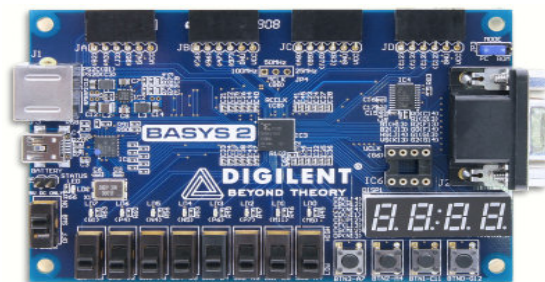


Figura 1 Tarjeta de desarrollo Basys 2.

Para poder realizar las mediciones con los diferentes sensores, se utilizaron diferentes protocolos de comunicación, (RS232 e I2C). Se empezó con el desarrollo de los drivers de estos protocolos de comunicación, figura 2.

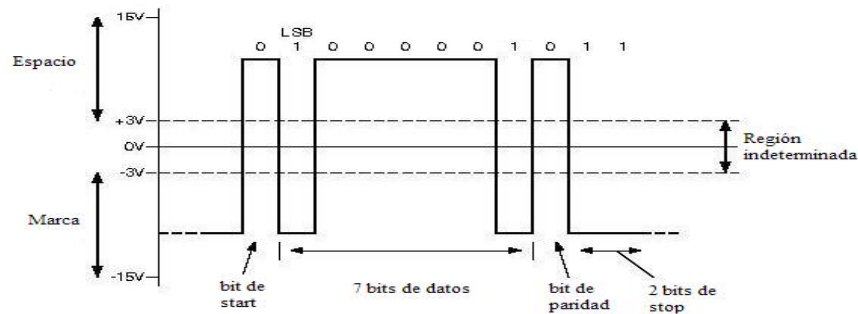


Figura 2 Trama de comunicación del bus RS232.

## RS232

El primer paso fue describir en código VHDL el diagrama de bloques del RS232 de la figura 3. Para la visualización se usó un osciloscopio marca HAMEG modelo HMO 1002, el cual cuenta con siete entradas digitales para realizar pruebas de funcionamiento de protocolos de comunicación como son el RS232, I2C, CAN, LIN, SPI y SSPI. Se conectó la FPGA al probador de protocolos para comprobar su funcionamiento y verificar la correcta transmisión de datos [10].

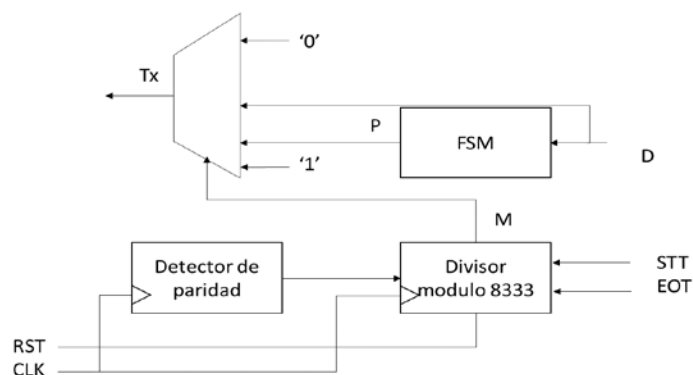


Figura 3 Diagrama de bloques para FPGA del transmisor RS232.

RS232 es un protocolo de comunicación serial asíncrono, que tiene la característica de ser punto a punto. Este protocolo de comunicación no permite la

creación de redes [6]. Las especificaciones eléctricas del puerto serial están contenidas en el estándar RS232 de EIA (Electronics Industry Association) que establece los siguientes parámetros:

- Un "Espacio" (0 lógico) está entre +3 y +15 volts.
- Una "Marca" (1 lógico) estará entre -3 y -15 volts.
- La región entre +3 y -3 volts es indefinida.
- Un circuito abierto nunca debe exceder 25 volts (con referencia a tierra).

La interfaz está limitada normalmente a velocidad de 20 kbps para distancias del orden de 15 metros. Para el diseño de la plataforma propuesta se eligió una velocidad de 1.2 kbps. En la figura 2 se muestra la trama de comunicación que utiliza el protocolo RS232 donde se observa la secuencia de inicio y de fin, además del bit de paridad para la comprobación del correcto envío de datos. En la figura 3 se observa el diagrama de bloques para el protocolo RS232, donde se utiliza un divisor de frecuencia para generar la velocidad de transmisión de 1.2 kbps, una máquina de estados donde se encuentra el control del bloque principal, el detector de paridad y el multiplexor donde se introduce la información y la entrega por el bus Tx [11].

## **I2C**

Se utilizó la estructura del diagrama de bloques del RS232 para diseñar el protocolo I2C, modificando la máquina de estados y el divisor de frecuencia para obtener además el bus de sincronización del protocolo I2C. Una vez que se desarrolló el código en VHDL para el protocolo I2C, se realizaron pruebas con el probador de protocolos del osciloscopio para verificar la correcta transmisión de datos y el buen funcionamiento del protocolo.

El bus I2C es un estándar que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos con cierto nivel de "inteligencia", sólo requiere de dos líneas de señal y un común o masa. Fue diseñado a este efecto por Philips y permite el intercambio de información entre muchos dispositivos a una velocidad aceptable, de unos 100 Kbps, aunque hay casos especiales en los que el reloj



llega hasta los 3,4 MHz. Para el diseño del protocolo se eligió una velocidad de 100Kbps [6]. La metodología de comunicación de datos del bus I2C es en serie y sincrónica. Una de las señales del bus marca el tiempo (pulsos de reloj) y la otra se utiliza para intercambiar datos [7]. Descripción de las señales:

- SCL (System Clock) es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.
- SDA (System Data) es la línea por la que se mueven los datos entre los dispositivos.
- GND (Masa) común de la interconexión entre todos los dispositivos "enganchados" al bus.

En la comunicación I2C existen dos modalidades de comunicación. La primera modalidad es el modo maestro la cual se encarga de establecer la comunicación con los demás dispositivos conectados al sistema mediante la generación de estados de inicio y parada, además genera el tren de pulsos para la sincronización. La segunda es en modo esclavo, en este modo sólo se recibe el tren de pulsos para la sincronización y no puede generar inicio de comunicación con otro dispositivo, sólo puede responder a las peticiones de lectura o escritura del maestro [12].

En la figura 4 se observa la trama de comunicación del bus I2C, el modelo que se propone es el modo maestro para tener control sobre los dispositivos que se tienen planeado conectar en la FPGA.



Figura 4 Trama de comunicación del bus I2C.

## Sensor de temperatura y humedad SHT75

El primer paso fue diseñar el bloque de programación para la secuencia de inicio de comunicación y reinicio de comunicación. Luego se programó la máquina de estados, el módulo del divisor de frecuencia y el multiplexor para la salida y entrada de datos de la FPGA. Se utilizó el osciloscopio para realizar pruebas con el protocolo.

Se agregó un nuevo bloque de programación para poder utilizar el display de la FPGA. Después se procedió a conectar el sensor SHT75 en la FPGA y se realizaron diferentes mediciones dentro de un refrigerador y en una habitación cerrada con un calentador encendido, además se utilizó el display de la FPGA para poder mostrar los datos obtenidos por el sensor SHT75.

Mediante la ecuación 1 se calculó la temperatura, siendo  $SO_t$  la medición obtenida del sensor de temperatura. Con las ecuaciones 2 y 3 se calcularon la humedad lineal (sin compensación de temperatura) y la humedad compensada, siendo  $SO_{rh}$  la medición que entrega el sensor de humedad y  $T$  la temperatura calculada [13].

$$T = -39.7 + 0.01 * SO_t \quad (1)$$

$$RH(\text{lineal}) = -2.0468 + (0.0367 * SO_{rh}) + (-1.5955E - 6) * SO_{rh}^2 \quad (2)$$

$$RH(\text{compensada}) = (T - 25) + (0.01 + 0.00008 * SO_{rh}) + RH(\text{lineal}) \quad (3)$$

El SHT75 es un sensor de temperatura y humedad de la marca SENSIRION, utiliza la comunicación serial para el envío de datos obtenidos de las diferentes variables físicas que mide. El sensor cuenta con un rango de operación de -40 °C a 123.8 °C, una resolución típica de 0.01 °C y un tiempo de espera de medición de 320 ms para el caso del sensor de temperatura. En cuanto a la humedad, cuenta con una resolución de 0.05%RH, un rango de operación de 0% a 100% y un tiempo de espera de medición de 80 ms. Se alimenta con un voltaje típico de 3.3 V, aunque admite de 2.4 V a 5.5 V [13].

El protocolo de comunicación que utiliza el sensor SHT75 es similar al I2C, sin embargo, hay varios cambios en la trama de comunicación como es la secuencia de inicio que se observa en la figura 5, la secuencia de reinicio de comunicación

que se observa en la figura 6 y el tiempo de espera de medición de 80 ms, tiempo que utiliza el sensor para realizar la medición de la variable ambiental y preparar la secuencia de transmisión de información [13].

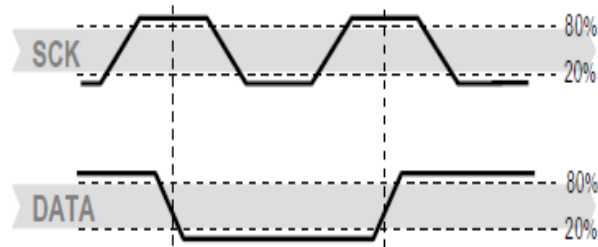


Figura 5 Secuencia de inicio de comunicación.

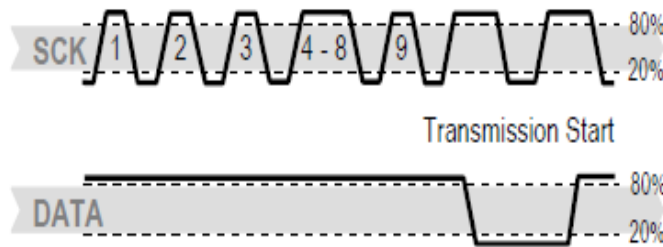


Figura 6 Secuencia de reinicio de comunicación.

En la figura 7 se observa el ejemplo de comunicación donde se mide la humedad, en este ejemplo el sensor devuelve un dato de 16 bits donde sólo los 12 bits menos significativos contienen la información de la medición realizada.

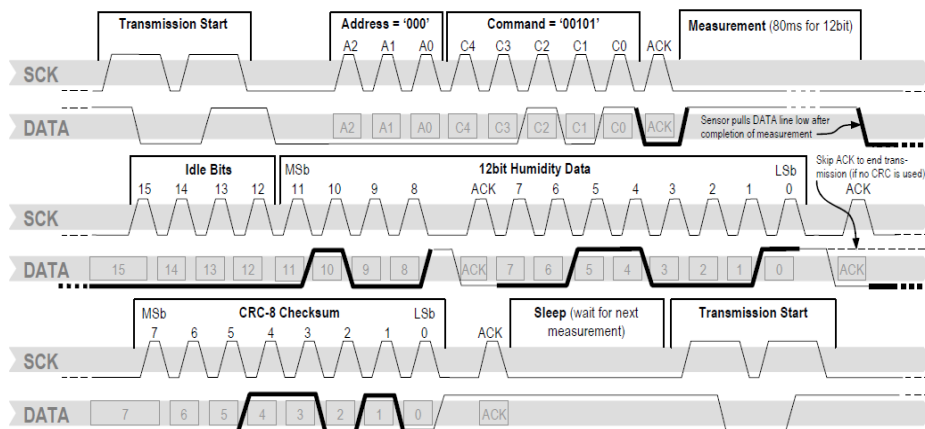


Figura 7 Ejemplo de comunicación para lectura de humedad.

### 3. Resultados

#### Protocolo RS232

Con la ayuda de osciloscopio HAMEG HMO 1002 series, el cual cuenta con entradas digitales para realizar pruebas de funcionamiento de protocolos de comunicación, se probó el protocolo realizado en la FPGA enviando el dato “0001 0001” al osciloscopio para verificar el correcto funcionamiento del protocolo RS232. En la figura 8 está la captura del osciloscopio donde se observa que el dato enviado fue leído correctamente. Después, se realizó una nueva prueba cambiando el dato “0001 0001” por “1010 1010”. La figura 9 muestra la captura del osciloscopio donde se ve la tabla de datos leídos por el probador digital.

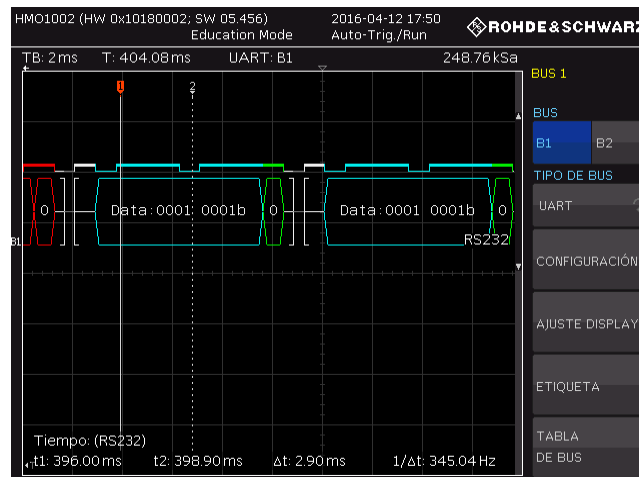


Figura 8 Señal obtenida de la FPGA por el probador digital de protocolos.

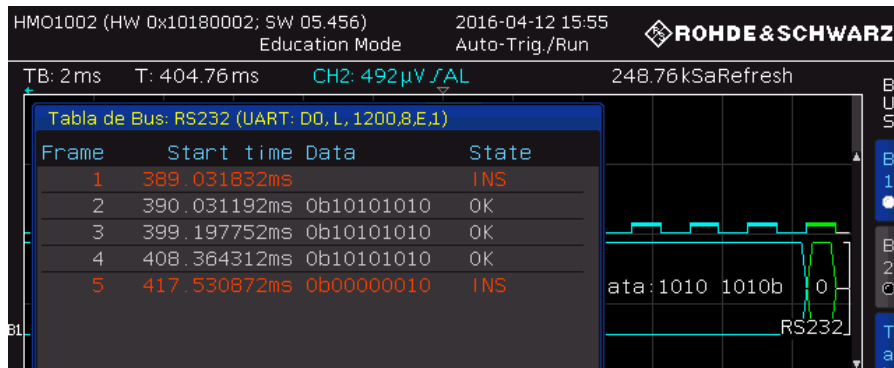


Figura 9 Tabla de datos leídos por el probador digital, para el protocolo RS232.

## Protocolo I2C

En la figura 10 se presenta el diagrama final realizado para el protocolo I2C, el cual se diseñó para ser el dispositivo maestro debido a que los sensores que se van integrar a la plataforma son esclavos.

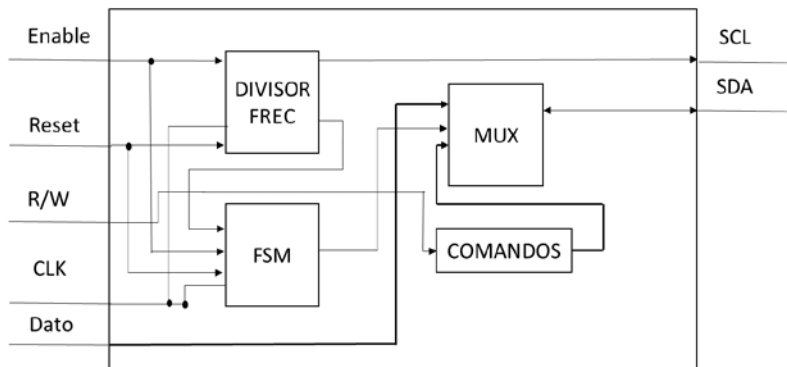


Figura 10 Diagrama de bloques final del bus I2C para FPGA.

Primero se probó el modo escritura en el cual se envió el dato binario “1010 1010”, que corresponde al valor hexadecimal “AA”, al dispositivo con la dirección “0000 1111”, que corresponde a un valor hexadecimal “0F”. En la figura 11 se observa la información recibida por el probador digital de protocolos. Para comprobar el modo de lectura se utilizó la misma dirección “0F” de dispositivo y se leyó el dato “C4” en hexadecimal del osciloscopio, en la figura 12 se observa la señal obtenida de la FPGA y el dato enviado por el osciloscopio.

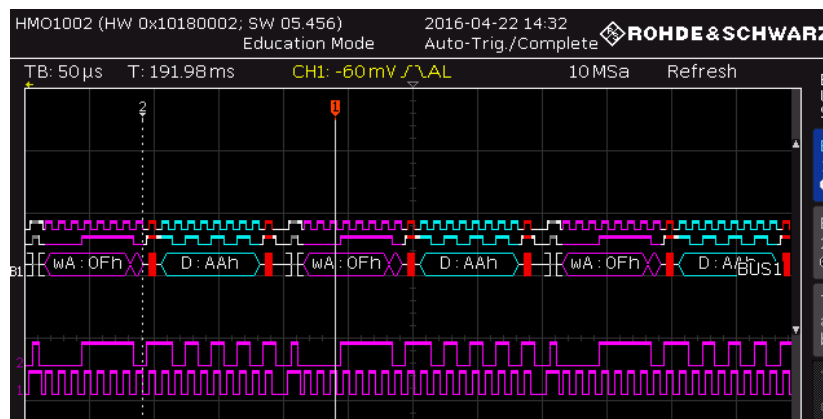


Figura 11 Señal obtenida de la FPGA en modo escritura, probador digital de protocolos.

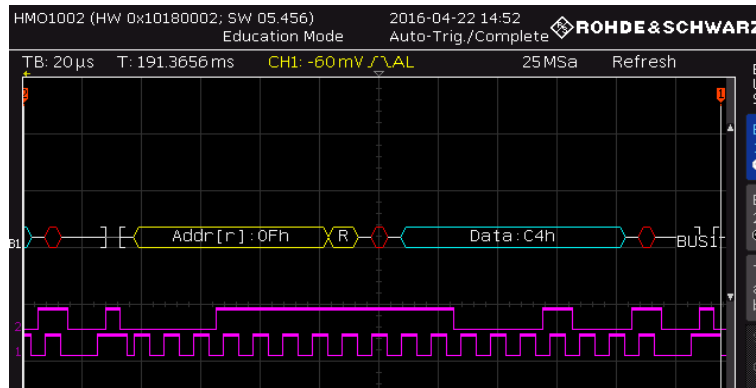


Figura 12 señal obtenida de la FPGA y el dato enviado por el osciloscopio.

### Protocolo Sensor SHT75

Antes de realizar la comunicación serial con el se comprobó que la señal enviada por la FPGA fuera correcta, para esto se utilizó el probador digital de protocolos. La figura 13 muestra la, las tramas de inicio y reinicio de comunicación concuerdan con las señales SCK y data, de la figura 7.



Figura 13 Señal obtenida de la FPGA, sensor SHT75.

Cabe mencionar que solamente se utilizó el 17% de los recursos de la FPGA Basys 2 que es una tarjeta de gama baja.

Las mediciones de prueba del sensor se realizaron dentro de un refrigerador (figura 14), donde se tomaron mediciones de temperatura (figura 15) y humedad (figura 16):

- 1ª sección se abrió y cerró la puerta del refrigerador conectado.
- 2ª sección se desconectó el refrigerador para aumentar temperatura.

- 3ª sección se abrió y se volvió a cerrar la puerta del refrigerador desconectado. 4ta sección se dejó abierta la puerta hasta estabilización a temperatura

El error promedio de temperatura fue de 18.74%. El error promedio de humedad lineal fue de 20.04% mientras que el error promedio en humedad compensada fue de 16.81%.

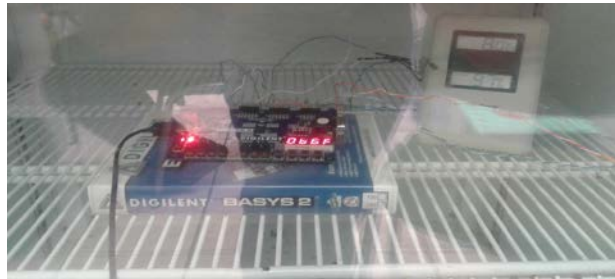


Figura 14 Prueba de medición realizada en un refrigerador.

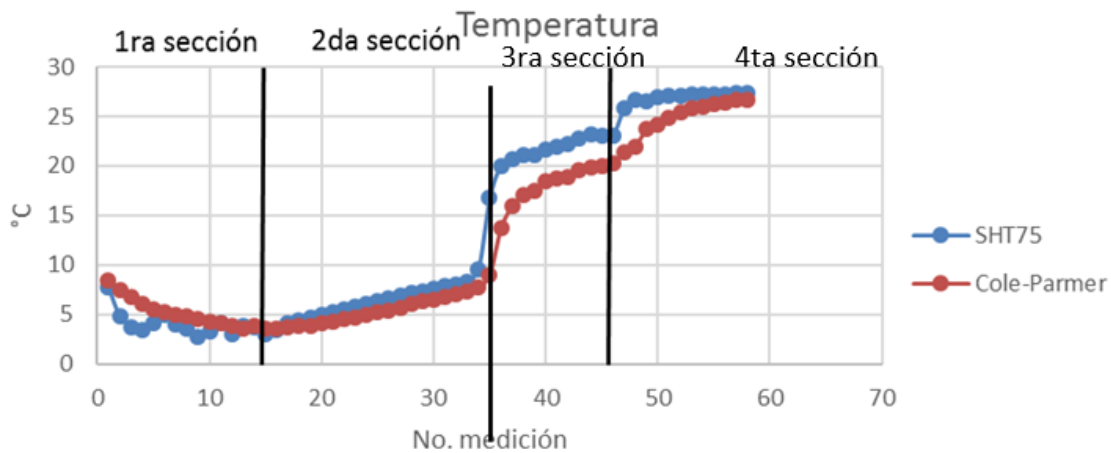


Figura 15 Variación de temperatura en refrigerador. ambiente.

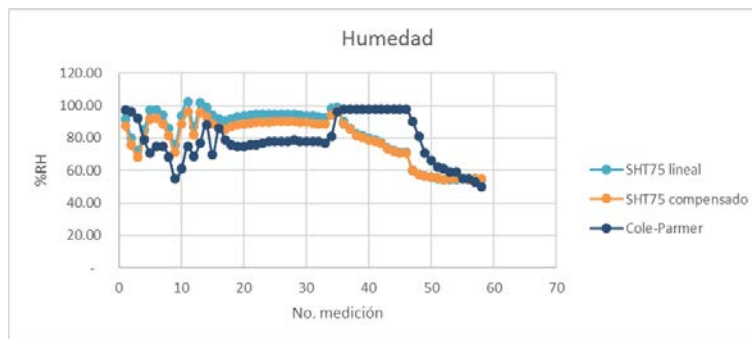


Figura 16 Variación de humedad en refrigerador.

También se realizaron pruebas con el sensor SHT75 en una habitación con temperaturas más elevadas (figuras 17 y 18). El error promedio de temperatura fue de 2.35%. El error promedio de humedad lineal fue de 36.36% mientras que el error promedio en humedad compensada fue de 39.7%.

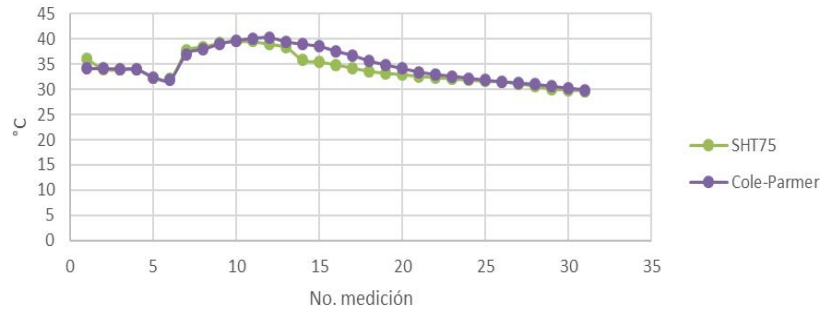


Figura 17 Variación de temperatura en habitación, sensor SHT75.

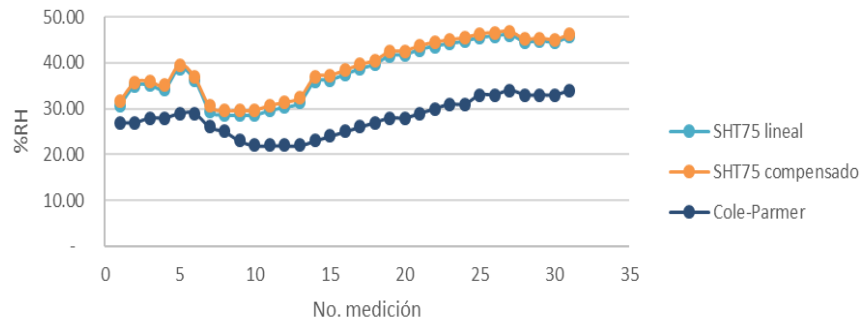


Figura 18 Variación de humedad en habitación, sensor SHT75.

#### 4. Discusión

A través de las figuras 8 y 9 se comprueba que la descripción VHDL generada para el protocolo RS232 funcionó correctamente. Esto fue un primer paso necesario para, a partir de aquí, modificar la estructura de este módulo y desarrollar el de I2C.

Las figuras 11 y 12 confirman que la descripción VHDL del módulo I2C funciona correctamente, logrando la comunicación con el osciloscopio y el probador digital en modos de lectura y escritura. Una vez asegurada la correcta comunicación I2C, se modificó este módulo para adecuar la comunicación con el sensor SHT75.



Dado que el SHT75 tiene un protocolo de comunicación cercano al I2C, pero con algunas variantes, se logró generar un módulo VHDL específico para su comunicación. La figura 7 muestra las señales específicas que requiere este sensor para inicio y reinicio de la comunicación (ver señales SCK y Data). La figura 13 muestra cómo es que efectivamente se logró la generación de estas señales, asegurando la comunicación con el sensor.

Una vez que se probó dicha secuencia se procedió a conectar el sensor en la FPGA y realizar mediciones dentro de un refrigerador, como se muestra en la figura 14, además se utilizó un termómetro Cole-Parmer, para comparar las mediciones obtenidas por el sensor SHT75. En la figura 15 se observan los datos de temperatura obtenidos en el refrigerador. Estas mediciones se realizaron cada dos minutos. Al realizar dicha prueba se observó que el termómetro comercial tardaba más tiempo en detectar dichos cambios de temperatura mientras que el sistema con el sensor SHT75 mostró ser más rápido al detectar los cambios de temperatura. Esto se comprueba observando los datos obtenidos en la 1ª sección de la figura 15, donde el refrigerador encendía y apagaba el sistema de enfriamiento; aquí el sensor detectó los cambios de temperatura producidos mientras que el termómetro comercial no detectó ninguno de estos cambios. En la 2ª sección de la figura 15 se apagó el refrigerador para hacer que éste aumentara abruptamente su temperatura y observar el comportamiento del sistema de medición. El refrigerador permaneció desconectado para las siguientes secciones. En estas mediciones se observó un comportamiento lineal por parte de ambos sistemas de medición. En la 3ª sección se abrió y cerró la puerta del refrigerador donde nuevamente el sensor SHT75 detectó de manera más rápida los cambios de temperatura. En la 4ª sección se abrió nuevamente la puerta y se dejó estabilizar la temperatura del refrigerador a la temperatura ambiente donde los dos sensores se igualaron.

En la figura 17 se observan los datos obtenidos en una nueva prueba que se realizó en una habitación cerrada donde se utilizó un calentador para elevar la temperatura y realizar diferentes mediciones con el sistema, en temperaturas más elevadas. En esta gráfica se observa cómo al ser más lento el incremento de

temperatura, ambos sensores presentan mediciones muy similares a diferencia de la prueba del refrigerador donde los cambios de temperatura fueron más rápidos. Las figuras 16 y 18 muestran las mediciones de humedad obtenidas por el sensor y el instrumento de medición comercial en las pruebas realizadas en el refrigerador y la habitación cerrada, respectivamente. En este caso se calcularon dos valores de humedad uno con compensación de temperatura y otro sin la compensación de temperatura, siendo ambos similares. La medición sin compensar arroja valores por arriba del 100% de humedad, es por esta razón que el fabricante recomienda usar la compensación de temperatura para valores de temperatura diferentes de 25 °C.

Cabe resaltar que la medición de humedad se realizó simultáneamente con la de temperatura, esto para poder calcular la humedad con la compensación de temperatura. El error promedio obtenido es muy elevado, esto se puede deber a:

- La lenta respuesta del sensor de referencia.
- A falta de calibración del sistema de referencia.
- O a un desajuste en el algoritmo de medición del SHT75.

Sin embargo, las figuras 15, 16, 17, y 18 muestran que ambos sistemas siguen formas semejantes (hablando de humedad) y convergen en los mismos valores a largo plazo (hablando de temperatura), esto hace suponer que las mediciones no están del todo mal. En un futuro se tendrá que comparar con otros sistemas de medición para hacer los ajustes pertinentes.

## **5. Conclusiones**

Se logró comprobar satisfactoriamente el envío de datos del protocolo RS232 mediante el probador de protocolos, lo cual sienta las bases para poder conectar los sensores que cuenten con este método de comunicación.

Se comprobó el bus I2C en modo maestro y se verificó que escribiera y leyera datos correctamente mediante el probador digital. Se utilizó un “arduino uno” para comprobar que realizara la comunicación correctamente con una plataforma

comercial con el protocolo I2C. Esta prueba resultó satisfactoria debido a que se realizó correctamente el envío de datos.

Se realizó correctamente el protocolo de comunicación propio del sensor SHT75 y además se obtuvieron diferentes mediciones de temperatura y se comprobaron con un termómetro comercial. El sensor SHT75 demostró poder medir cambios de temperatura más rápido que el comercial. De manera semejante, se realizaron pruebas de humedad donde el SHT75 mostró seguir tendencias similares al instrumento comercial. En el trabajo a futuro se planea comparar con otros instrumentos de medición y ajustar el error del sistema desarrollado.

En el trabajo futuro también se planea describir e implementar en el FPGA protocolos de comunicación SMBus y frecuencímetros para interconectar con sensores de luminosidad. Una vez implementada la comunicación y el procesamiento digital se caracterizará el sistema de iluminación. De esta forma se integrará en FPGA una plataforma de medición ambiental. Otro punto que se deberá lograr en un futuro es la transmisión de datos hacia una computadora, para su almacenamiento, procesamiento, y monitoreo.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] C. Vera, J. Barbosa, D. Pabón, "Acople de sensores en la medición de variables ambientales usando tecnología ZigBee". *Scientia et Technica* Año XIX. Vol. 19. No. 4. 2014. Pp 419-423.
- [2] G. Ampuño, M. Gómez, W. Agila, "Monitoreo y control distribuido de micro-unidades de regulación de humedad y temperatura para invernaderos a través de *Clouds*". *Tecnológica ESPOL – RTE*. Vol. 28. No. 5. 2015. Pp 258-272.
- [3] A. López, "Medición de temperatura mediante sensores inteligentes basados en microcontrolador". *UNIMAR*. Vol. 32. No. 2. 2014. Pp 107-127.
- [4] C. Vera, J. Barbosa, D. Pabón, "Parámetros de configuración en módulos XBEE-PRO® S2B ZB para medición de variables ambientales". *Tecnura*. Vol. 19. No. 45. 2015. Pp 141-157.

- [5] M. Gaspar, C. Gutiérrez, G. Bobadilla, J. Jiménez, P. Quinto, J. Barbosa. "Temperature acquisition board of low building and programing cost". DYNA. Vol. 91. No. 4. 2016. Pp 397-401.
- [6] O.L. Espinosa, G. A. Villavicencio Pérez, S. A. Díaz Luna, "Paquete tecnológico para el monitoreo ambiental en invernaderos con el uso de hardware y software libre". Terra Latinoamericana. Vol. 32. 2013. Pp 77-84.
- [7] P. Venkateswaran, A. Saynal, S. Das, S.K Saynal, R. Nandi, "Design and implementation of FPGA based interface model for scale-free network using I2C bus protocol on Quartus II 6.0." 4th International Conference on Computers and Devices for Communication, IEEE. 978-81-8465-152-2/09. 2009.
- [8] C. L. Herrera, M. Quiñones Cuenca, "Diseño e implementación de un servidor web embebido basado en una arquitectura reconfigurable con FPGAs para el control y monitoreo de periféricos".Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones. 2012.
- [9] Basys 2 FPGA, Datasheet, Digilent. Revisión C. USA. 2016.
- [10] Osciloscopio HMO 1002, Datasheet, HAMEG Instruments GmbH. Germany. Version 01.00. 2014.
- [11] R. Romero Troncoso, Electrónica Digital y Lógica Programable. 2007. Ed. Universidad de Gto. México,
- [12] R. Manzano, M. Pérez, R. Ponguillo, "Diseño de un módulo de propiedad intelectual basado en FPGA para el manejo del bus I2C". Revista tecnológica ESPOL.
- [13] Humidity Sensor SHT75, Datasheet, SENSIRION AG, Switzerland. Version 5. 2011.

## **7. Autores**

Julio César Regalado Sánchez estudiante de 10° semestre de la carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Celaya, Sus áreas de interés incluyen: procesamiento de sistemas digitales en FPGA y procesamiento de imágenes digitales en el espectro visible.

Alejandro Espinosa Calderón recibió su título de Doctorado de la Universidad Autónoma de Querétaro, en Querétaro, Qro., Mex., en 2012, de donde obtuvo honores, la medalla al mérito académico, y el premio a la mejor tesis doctoral. Ha participado en eventos científicos internacionales en EEUA, Italia y China. Ha recibido premios internacionales de la OSA y USAID, ambos de EEUA. Desde 2013 trabaja en el Dpto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Sus áreas de interés incluyen: Instrumentación electrónica y procesamiento en sistemas digitales FPGA/microprocesadores.

J. Alfredo Padilla Medina recibió su grado de Doctor en Filosofía del Centro de Investigaciones en Óptica, en León, Gto., Mex., en 2003. Actualmente es profesor-investigador de tiempo completo en el Dpto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores con nivel I. Sus áreas de interés incluyen: procesamiento de imágenes digitales en el visible e infrarrojo, el sistema visual humano, y la lógica difusa.

Javier Díaz Carmona recibió su grado de Doctor en Ciencias del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, en Puebla, Pue., Mex., en 2003. Desde 1991 trabaja en el Dpto. de Ing. Eléctrica y Electrónica del ITCelaya. Ha participado en más de 40 artículos. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores con nivel I. Sus temas de interés incluyen: procesamiento digital de señales, filtros digitales, y aplicaciones de sistemas embebidos FPGA/DSP.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el apoyo económico para la realización de este proyecto.

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ENTRENAMIENTO PARA EQUIPO DE PERFORACIÓN BASADO EN EL MICROCONTROLADOR PIC16F877A**

***Eddy Rabanales Márquez***

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
*eddy.rabanales@ujat.mx*

***Reymundo Ramírez Betancour***

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
*reymundo.ramirez@ujat.mx*

***Julio Cesar Ramírez Hernández***

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
*julio.ramirez@ujat.mx*

***Fermín Martínez Solís***

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco  
*fermin.martinez@ujat.mx*

## **Resumen**

Hoy en día la simulación de procesos industriales, que conllevan alto riesgo, es de suma importancia para que los operadores adquieran las habilidades necesarias para manipular los sistemas en la vida real; estos simuladores tienen un costo muy elevado por lo cual son de difícil acceso para las instituciones educativas. El propósito del presente trabajo es desarrollar un sistema de entrenamiento para controlar la operación del malacate y las bombas de lodo en un equipo de perforación de pozos petroleros. El sistema desarrollado consta de un tablero de mando formado por 10 botones pulsadores, 4 perillas giratorias, 3 paros de emergencia y un joystick. El tablero está basado en el microcontrolador PIC16F877A, éste se comunica con la PC a través del puerto serial RS232. Se diseñó un programa en Labview que recibe los datos enviados por el

microcontrolador, los interpreta y muestra gráficamente el comportamiento del malacate de acuerdo a lo seleccionado por el operador.

**Palabra(s) Clave(s):** Labview, microcontrolador, perforación, simulador de malacate, tablero.

## 1. Introducción

Un equipo de perforación petrolera está integrado de varios equipos individuales que combinados forman una unidad integral capaz de perforar pozos. Los equipos de perforación rotatoria se clasifican en terrestres, lacustres y marinos, como se muestra en el esquema de la figura 1 [1].

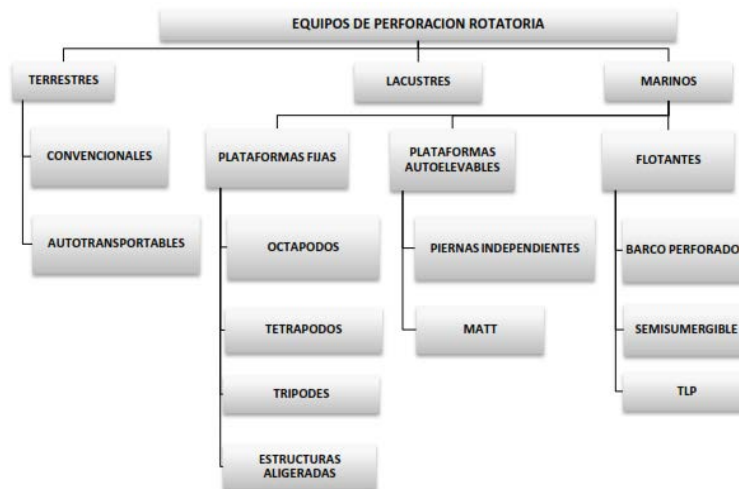


Figura 1 Clasificación de los equipos de perforación rotatoria.

Un equipo de perforación terrestre se compone básicamente de cinco sistemas denominados: sistema de potencia, sistema de izaje o levantamiento, sistema de rotación, sistema de circulación de fluidos y sistema de seguridad contra reventones. En este trabajo sólo se hará referencia a equipos del sistema de izaje o levantamiento y sistema de circulación de fluidos [2].

La función principal del sistema de izaje es la de soportar todo el sistema de rotación mediante la utilización de equipos apropiados capaces de levantar, bajar y suspender los pesos requeridos por él. Este sistema se compone de los siguientes equipos:

- Estructura de soporte: es la armadura de acero que se levanta sobre una subestructura situada en el piso de perforación del pozo y se conforma de la torre de perforación o mástil; el cual debe soportar el peso de la sarta de perforación (tuberías de perforación) en todo momento, mientras la sarta está suspendida del bloque de la corona (conjunto de poleas, que sostienen y dan movilidad al bloque viajero) y cuando descansa en la mesa rotaria o topdrive.
- Equipo de levantamiento: Son equipos especializados para levantar, bajar y suspender la sarta de perforación, tales como el malacate que es la unidad de potencia más importante del sistema de izaje. Cuenta con un tambor rotatorio, provisto de ejes y un motor de inducción para el cambio de velocidades, giro en reversa y frenado. El cable de perforación que se enrolla varias veces en el tambor y pasa a través de las poleas de los bloque corona y viajero. El gancho localizado de bajo del bloque viajero al cual va unido y de la cual va suspendida la unión giratoria o cuadrante y la sarta de perforación. Además, sostiene el elevador hidráulico durante el ascenso y descenso de la tubería o sarta de perforación. La cuña hidráulica cuya superficie interior es curva y dentada. Durante el viaje de la tubería, la sarta se sostiene alternativamente por el bloque viajero y la cuña hidráulica sujetándola por acción combinada de fricción y mordedura.

De esta forma se puede decir que, el malacate es el elemento principal del sistema de izaje de un equipo de perforación, ya que suministra la fuerza para sostener la sarta a través del elevador y el gancho. Por lo que es de vital importancia tener un control preciso de dicho elemento para evitar accidentes y hacer más eficiente el proceso de perforación.

Por otro lado, el proceso de perforación requiere de un sistema de fluidos que permita lubricar la sarta de perforación, evitar el colapso del pozo debido a la presión de formación y conocer a través del retorno de los recortes de formación la geología exacta del pozo. El sistema de circulación tiene cuatro componentes principales: el fluido de perforación; el área de preparación; el equipo de



circulación y el área de acondicionamiento. El equipo de circulación consiste de la presa de succión, de la tolva de mezclado, de la línea de succión y descarga, tubo vertical, manguera rotatoria, sarta de perforación, el anular, la línea de retorno, tanque o presa de asentamiento, el área de acondicionamiento y de las bombas de lodo que son el corazón del sistema de circulación y mueven grandes cantidades de lodo bajo presión [3].

Actualmente los nuevos equipos de perforación de nueva generación se basan en elementos HMI y tableros de control digital, estos elementos tienen mayor sensibilidad que los tradicionales electromecánicos. Por tal razón es necesario entrenar a los operadores usando simuladores que le permitan adquirir las habilidades de operación (sensibilidad adecuada). Así, con el aumento del uso de tecnologías de vanguardia, es aún más importante que personal de perforación aprenda en un ambiente seguro [4,5].

En la industria se utilizan simuladores comerciales como el KCA Deutag's DART; el cual utiliza gráficos 3D, simulación en tiempo real y efectos de sonido para proporcionar realismo al proceso de simulación de perforación. La planta de DART en Aberdeen, Escocia, tiene copias a escala de una plataforma de perforación marina y terrestre. Este simulador está equipado con consolas de pantalla touch para el perforador y el asistente, gráficos en tres dimensiones del piso de perforación y equipos de la plataforma se proyectan en una pantalla larga de 60 pies que rodea la cabina de perforación. Asimismo, cuando el perforador opera el equipo de aparejo, el simulador de superficie proporciona gráficos móviles y sonidos para emular lo que se ve y se oye en una plataforma real [4].

Por otro lado, la empresa LUKOIL ha desarrollado un simulador para plataforma marina (offshore) con el sistema de control Emerson Process Management. El sistema se compone de cinco estaciones de trabajo (PCs) conectadas al algoritmo de control DCS/SIS, que permite usar valores simulados de entrada. La PCs pueden tomar las siguientes funciones: operador, supervisor, cuarto de control central y operador de campo. Las pantallas de las estaciones de trabajo son exactamente iguales a las que se tienen en la plataforma de perforación. Las cinco

estaciones de trabajo se conectan mediante una red local a la PC del instructor, mediante la cual se pueden simular diferentes escenarios de operación [5]. Usualmente los simuladores comerciales están compuestos por una PC y aditamentos que reciben las órdenes del usuario; estos aditamentos se pueden comunicar con la computadora por medio de protocolos punto a punto (seriales o paralelos) o de protocolos de red más sofisticados (Ethernet o anillo). En el presente trabajo se diseñó un sistema de entrenamiento de bajo costo para operar los equipos principales de un sistema de perforación; el sistema consta de tableros de control digital, un joystick y el programa simulador del comportamiento del malacate, de las bombas de lodo, del elevador y cuña hidráulica. El tablero de control está basado en un microcontrolador PIC16F877A, el cual recibe e interpreta las órdenes del operador y las transmite a la PC por medio del puerto serie mediante el protocolo RS-232 [6].

## 2. Desarrollo

El sistema de entrenamiento está compuesto por el tablero de mando, un joystick y una computadora central. El tablero de mando permite al operador manipular el malacate y las bombas por medio de botones y perillas distribuidas tal como se muestra en la figura 2.



Figura 2 Tablero de mando.

Las perillas de los equipos de control deben girar a favor o en contra de las manecillas del reloj y permitir las vueltas que el operador desee. Este tipo de

componentes es muy costoso, por lo que se optó por utilizar un interruptor rotatorio de 1 polo-12 tiros y un conjunto de resistencias de  $220 \Omega$ , divisor de voltaje, para obtener el campamento deseado a un menor consto. La figura 3 muestra el circuito diseñado para cada perilla.

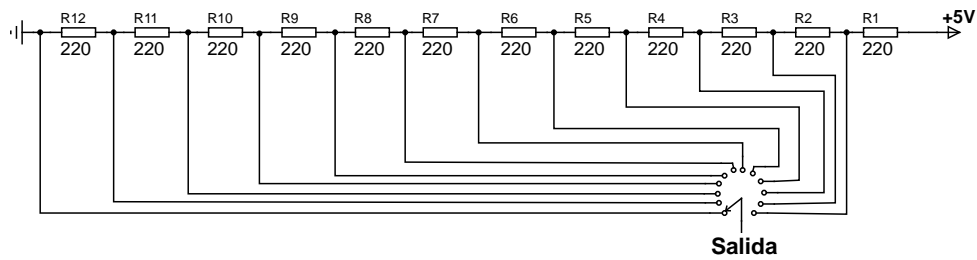


Figura 3 Diagrama de las perillas de control.

La salida de la perilla es un nivel de voltaje proporcional a la posición que se tenga en el divisor de voltaje; tal que si se hace girar la perilla, se presentará un cambio de nivel de voltaje. Este cambio se detecta, por medio del microcontrolador PIC16F877A, y permite determinar si se incrementa o decrementa el valor de la variable asociada a la perilla. Esta información y el estado de los botones de mando se envían a la PC mediante un protocolo de comunicación serial [6]. La figura 4 muestra los componentes y conexiones del tablero de mando.

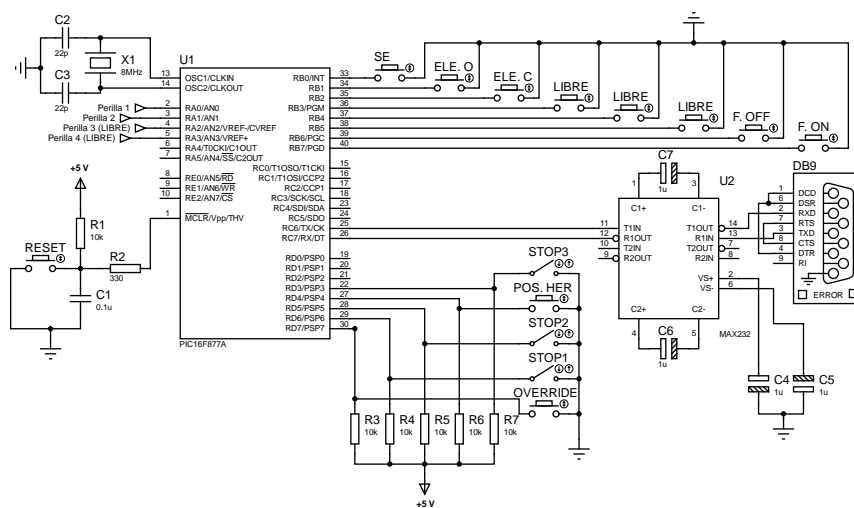


Figura 4 Diagrama electrónico del tablero de mando.

El microcontrolador PIC16F887 es un dispositivo de bajo costo con las siguientes características [6]: CPU de 8 bits, memoria de programa flash de 8 kBytes, 4 puertos paralelo, un puerto serie EUSART, 8 módulos convertidores de analógico/digital (ADC) de 10 bits, frecuencia de operación de 0 a 20 MHz, etc. Estas características son muy adecuadas para el diseño del tablero de mando. El microcontrolador se programó para que realice principalmente dos tareas: leer el estado del tablero de mando y enviar información a la PC por el puerto serie. La figura 5 muestra el diagrama de flujo que sigue el microcontrolador.

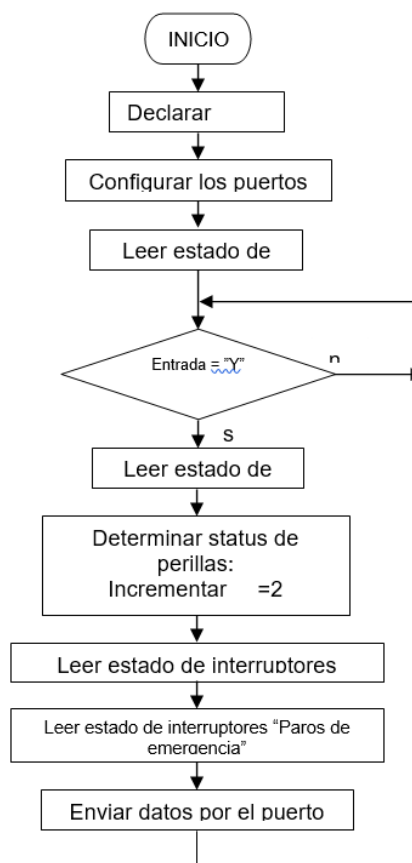


Figura 5 Diagrama de flujo del programa del microcontrolador.

La primera parte del programa consiste en la declaración de variables, configuración del ADC y lectura de la posición inicial de las perillas (AN0-AN3). El microcontrolador no envía datos hasta que aparece una “Y” en el puerto serie, lo cual indica que la PC esta lista para recibir información. Si se recibe un “Y”, entonces se lee las posiciones actuales de las perillas. Con las posiciones

actuales y las anteriores se determina el status de cada perilla: 2 se incrementó, 1 se decremento y 0 no se realizan movimiento. Posteriormente se leen los estados de los botones y paros de emergencia. Finalmente, la información de las perillas, botones y paros de emergencia es codificada y enviada por el puerto serial. Este proceso se repite cada vez que se recibe una “Y” en el puerto serie.

La PC se comunica con el microcontrolador por medio de un programa desarrollado en Labview [7]; el cual está formado por 3 módulos: 1) leer el estado del tablero de mando (Lee Botonera.vi); 2) un módulo que organiza las variables en memoria compartida (Server.vi) y 3) el programa principal que muestra la pantalla de control del malacate y de las bombas (Malacate.vi).

En la figura 6 se muestra la parte del diagrama principal en Labview del módulo “Lee Botonera”; éste recibe constantemente datos del puerto serie y decodifica las variables contenidas en el paquete de información, posteriormente almacena los valores del estado de todas perillas y botones del tablero. La cadena de datos recibida contiene 7 valores en el siguiente formato:

`%1d%1d%1d%1d%1d%2d%2d`

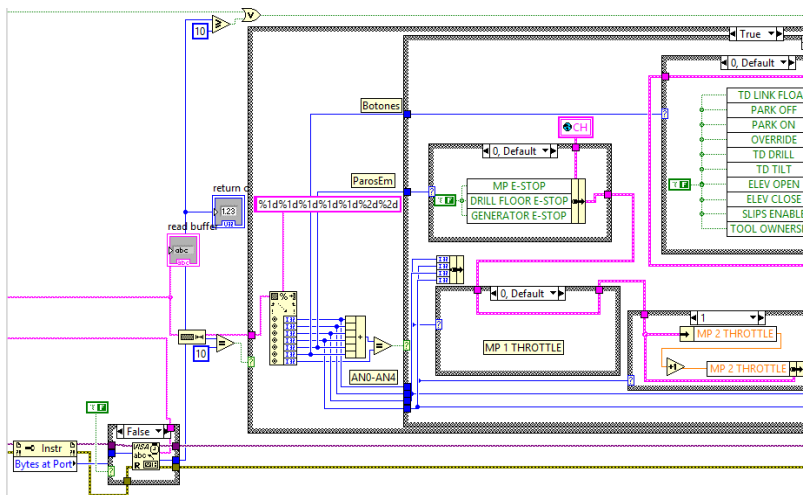


Figura 6 Diagrama en Labview del módulo “Lee botonera.vi”.

Donde cada campo corresponde a:

- Perilla 1 (Bomba1-SPM).
- Perilla 2 (Bomba2-SPM).
- Perilla 3 (TD-RPM).

- Perilla 4 (Rotaria-RPM).
- Paros de emergencia.
- Botones (push button).
- Suma de verificación (checksum).

Los valores para cada una de las perillas son de un dígito:

- 0 (perilla en reposo).
- 1 (giro a la derecha).
- 2 (giro a la izquierda).

Los paros de emergencia son uno de 3 posibles valores:

- 1 (paro en bombas).
- 2 (paro en piso de perforación).
- 3 (paro en el generador).

Los botones tienen un total de 11 posibilidades:

- 0 para ningún botón presionado.
- 1 para cuando está presionado el botón de flotar elevador hidráulico.
- 2 para frenado desactivado.
- 3 para frenado activado.
- 4 para cuando se presiona el botón anular límites.
- 5 activar el top drive para perforar.
- 6 invierte el giro del topdrive.
- 7 para cuando está presionado el botón abrir elevador.
- 8 para cuando está presionado el botón cerrar elevador.
- 9 para el mando activar cuñas.
- 10 para cuando está presionado el botón de apropiación de herramienta.

Finalmente el último campo de datos es una suma de verificación de dos dígitos, ésta sirve para comprobar la integridad del paquete.

La figura 7 muestra el diagrama de flujo del módulo en Labview que lee el puerto serie RS-232. El ciclo general consta de los siguientes pasos:

- Enviar carácter de sincronización.
- Esperar a que el buffer de entrada del puerto contenga un paquete completo (10 bytes). Una vez completado un paquete se proceder a leerlo y verificar la integridad del paquete por medio del código de verificación checksum, si el paquete esta integro se procede a extraer los datos del paquete. Estos datos son los valores de botones, perillas y paros de emergencia.
- Finalmente se verifica si hay alguna orden de finalizar, en caso verdadero se finaliza y en caso contrario se repite un nuevo ciclo.

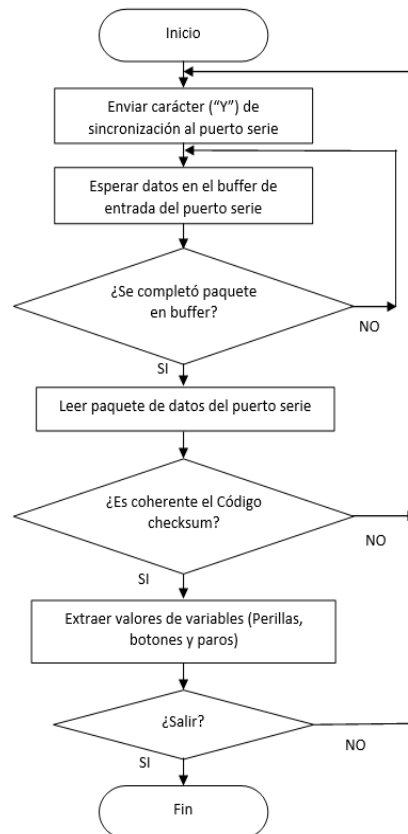


Figura 7 Diagrama de flujo del programa de comunicación en Labview.

El módulo “Server.vi” ejecuta al módulo “leer botonera” y simultáneamente lee las acciones del joystick, todos estos valores los almacena en dos memorias globales, una para el malacate y la otra para las bombas. Así, los datos leídos del puerto serial se guardan en dos variables globales llamadas GLOBAL\_MALACATE y

GLOBAL\_BOMBAS. El propósito de almacenarlas en memoria global es para que otros módulos tengan acceso a dichas variables. En la figura 8 se muestra el diagrama de conexiones de este módulo.

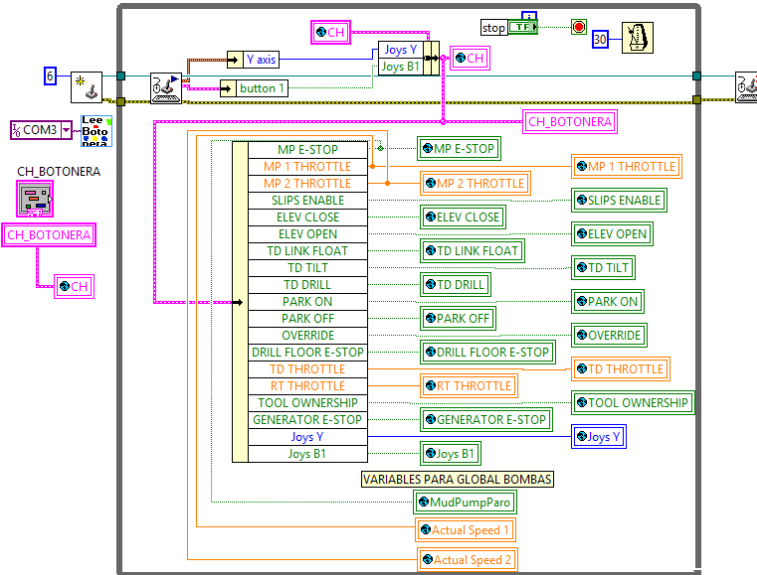


Figura 8 Diagrama en Labview del módulo “Server.vi”.

Por último, el módulo principal llamado “Malacate.vi” está formado por dos diagramas Labview: uno para atender el funcionamiento del Malacate y otro para la funcionalidad de las bombas. En la figura 9 se muestra la pantalla principal del programa. En la parte izquierda se muestran los elementos pertenecientes al malacate y en la parte derecha los elementos correspondientes a las bombas.

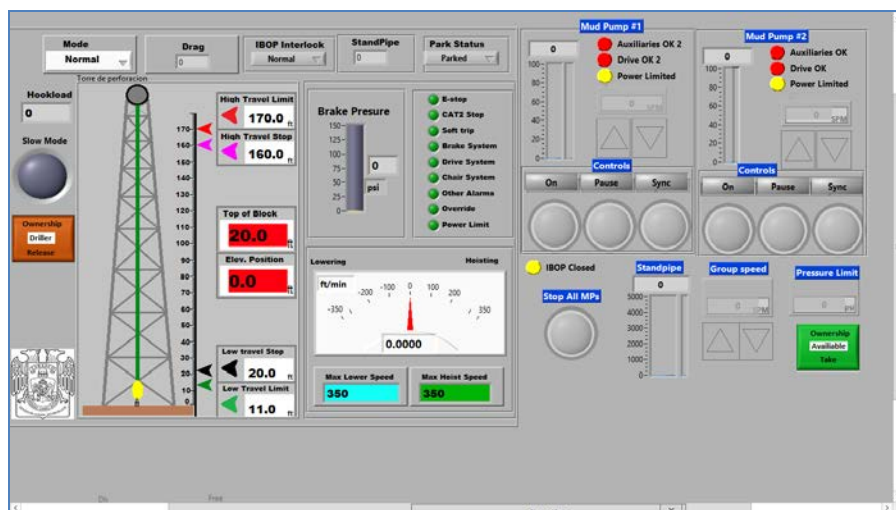


Figura 9 Pantalla principal de la aplicación.



### 3. Resultados

El sistema de entrenamiento demostró su correcto funcionamiento a través de diversas pruebas. La funcionalidad del malacate se refleja en el gráfico de la torre; conforme se mueve el Joystick (hacia el frente o atrás) se desplaza el block viajero verticalmente y a la vez muestra la velocidad de desplazamiento y la posición del mismo (figura 10). Los botones del tablero de mando que controlan al malacate son: override, park off, park on y drill floor e-stop. Para que el sistema permita mover el block viajero no debe haber ninguna alarma activada y se debe cumplir con una secuencia de inicio, esta es: tomar el control de la herramienta con el botón Ownership (ubicado en la pantalla del sistema); éste botón inicialmente se encuentra en verde, y al presionarlo cambia a color naranja, posteriormente presionar el botón park off (ubicado en el tablero de mando) éste botón permite liberar el freno para que el block viajero quede libre. Una vez cumplida con esta secuencia el sistema permitirá subir y bajar el block mediante el accionamiento del joystick.



Figura 10 Operación del malacate.

El botón override permite que el block se desplace hacia zonas no permitidas (esto es bajo la responsabilidad del operador), para ello el operario debe mantener presionado dicho botón y accionar el joystick; durante este modo de operación en la pantalla principal se refleja el estado del botón override a través de un led color verde para apagado y rojo para encendido. Finalmente para detener y mantener en estado de aparcamiento el block viajero, debe presionar el botón park on (ubicado en el tablero de mando).

Por otro lado, el sistema de circulación permite encender las bombas y ajustar sus emboladas (SPM) en forma individual o sincronizarlas para que operen al mismo valor (figura 11). A través de las perillas del tablero de mando se puede incrementar o decrementar el número de emboladas de cada bomba. Asimismo, de ser necesario se pueden detener ambas bombas, desde el tablero de mando, presionando el botón de paro de emergencia. De la misma forma que el malacate, para poder manipular las bombas en necesario tomar posesión de estas a través de botón Ownership.



Figura 11 Operación de las bombas.

#### 4. Discusión

Los resultados demuestran el correcto comportamiento del sistema de entrenamiento. El block sube o baja correctamente de acuerdo a la posición del joystick y las acciones realizadas a través del tablero de mando se reflejan en la pantalla del malacate o de las bombas, tal como se muestra en la figura 10 y figura 11.

Adicionalmente, el sistema de entrenamiento permite realizar otras funciones a través de interruptores táctiles, tales como: establecer límites de posición (superior e inferior) del block; mover lentamente el block; modificar la presión de las bombas; etc. Por tal motivo, el sistema de entrenamiento sólo puede ser utilizado en computadoras que tengan la función de pantalla táctil. En el presente trabajo se

realizaron las pruebas con una computadora portátil: procesador Intel Core i5, 8GB de memoria RAM, pantalla touch de 14 pulgadas.

## **5. Conclusiones**

El sistema de entrenamiento desarrollado para equipos de perforación es de bajo costo y está diseñado para que pueda ser transportado con facilidad. Este sistema ofrece a los estudiantes la posibilidad de adquirir experiencia con la operación de los nuevos sistemas de control basados en interfaces HMI, tableros de control digital y joystick de cualquier equipo comercial. El operador manipulará el malacate y bombas de lodo con la confianza de que cualquier error, que se pudiera cometer, no se reflejará en un daño a personas o al equipo mismo.

Como trabajo futuro se pretende incorporar todos sistemas (potencia, rotación, etc.) que requieren un equipo de perforación. Para lo cual se utilizarán los interruptores y perillas disponibles en el tablero de mando. Asimismo, es necesario desarrollar las pantallas asociadas a cada componente. La inclusión de todos estos componentes permitirá contar con un sistema de entrenamiento más completo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Un siglo de la perforación en México. Asociación de Ingenieros Petroleros de México. 2000. México.
- [2] R. Salas, Equipos de perforación y sus componentes. CIED: Centro Internacional de Educación y Desarrollo. Puerto de la cruz, Venezuela. 1995
- [3] El equipo de perforación y sus componentes. Schlumberger. México. 2013.
- [4] "Drilling Simulator Reduces Unplanned Events". World Oil. Vol. 226. No. 12. 2005. Pp. 9-10.
- [5] I. Vasilyevych y V. Kulikov, "High-accuracy simulator trains offshore oil platform operators". Offshore. Vol. 74. No. 6. 2014. Pp.56-59.
- [6] PIC16F887 Data Sheet. Microchip Technology. Estados Unidos. 2009
- [7] J. R. Lajara, J. Pelerí, Labview entorno gráfico de programación. 2da Edición. 2012. ALFAOMEGA. México

## **7. Autores**

M.C. Eddy Rabanales Márquez es profesor investigador de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, cursó sus estudios de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería electrónica en la Universidad de las Américas Puebla. Ha participado en proyectos para CFE y la industria privada.

Dr. Reymundo Ramírez Betancour recibió el grado de Doctor en la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Morelia, México en 2012. Es profesor investigador en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Sus áreas de interés son el modelado de sistemas, control de procesos, control y simulación de los FACTS, así como el análisis en estado estático y dinámico de sistemas eléctricos de potencia.

M.I. Julio Cesar Ramírez Hernández recibió el grado de Maestría en la Universidad de Guanajuato, México. Actualmente es profesor investigador de la licenciatura en Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

Dr. Fermín Martínez Solís es profesor investigador en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Recibió el grado de Doctor en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, México en 2013. Sus áreas de interés son instrumentación y control, mecatrónica aplicada a prótesis, control no lineal y electrónica de potencia.

# **REGISTRO DE RUTA SEGUIDA POR AUTOBUSES USANDO GPS Y ZIGBEE**

***José Ignacio Vega Luna***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Mario Alberto Lagos Acosta***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Gerardo Salgado Guzmán***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Víctor Noé Tapia Vargas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Francisco Javier Sánchez Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Se presenta la implantación de un sistema que registra en una memoria SD las coordenadas de la ruta seguida por un autobús y las transmite a una interface de usuario a su llegada a la terminal para su almacenamiento en un archivo y visualización en la aplicación Google Earth. Las coordenadas se obtienen por medio de un módulo GPS conectado a un microcontrolador que las almacena en un módulo SD y transmite inalámbricamente a la interface de usuario ubicada en una computadora de la oficina central de la terminal. La comunicación del autobús con la computadora se realiza usando transceptores ZigBee. Se utiliza un reloj de tiempo real RTC para contar con un método exacto y confiable que proporcione la

hora y fecha para registrar las coordenadas GPS en el módulo de memoria SD. El sistema cuenta con un botón de alarma que al activarse permite al operador enviar un mensaje de alerta GSM a un teléfono móvil.

**Palabra(s) Clave(s):** Coordenadas, comunicación inalámbrica, GPS, memoria SD, microcontrolador, ZigBee.

## 1. Introducción

El monitoreo de rutas y recursos usados por flotillas de vehículos ha traído como resultado la aparición de diversos proveedores de sistemas de rastreo satelital y aplicaciones que hacen uso de las coordenadas GPS registradas para funciones adicionales. Las funciones son optimización de rutas, para hacer más eficiente el uso de combustible, tiempos estimados de llegada y transmisión de video de la unidad, entre otras. Estos sistemas representan un costo elevado para las empresas propietarias de vehículos ya que en la mayoría de ellos el monitoreo es en tiempo real y por lo tanto el pago de renta por unidad, de \$1,000 USD en promedio, se incrementa en base a las funcionalidades contratadas. Ante esto, muchas empresas que no requieren monitoreo en tiempo real, han optado por adquirir aplicaciones que se ejecutan en una computadora y a las cuales les suministran manualmente las coordenadas de la ruta seguida por sus vehículos. Esto es, registran con un dispositivo móvil o un navegador satelital las coordenadas en una memoria SD y las importan en la aplicación o transmiten desde el dispositivo móvil o navegador satelital las coordenadas a la computadora por medio del puerto Bluetooth [1]. Esta solución tiene un costo mucho más bajo que las de tiempo real y el alcance de la transmisión de coordenadas desde el dispositivo móvil no es mayor a 10 metros lo cual está determinado por los transceptores Bluetooth.

El trabajo aquí presentado se desarrolló en base a solicitud de una empresa operadora de autobuses. La empresa cuenta con una aplicación que gráfica y optimiza rutas seguidas por los autobuses para hacer eficiente el uso de combustible. Actualmente suministran manualmente a esta aplicación las coordenadas GPS, obtenidas por medio de un navegador satelital, de la ruta de

cada autobús. La aplicación no cuenta con un sistema de registro automático de coordenadas de los autobuses, por lo que el requerimiento solicitado y objetivo de este trabajo fue construir el sistema que registre las coordenadas GPS de la ruta en una memoria SD y las transmita inalámbricamente a una computadora, al llegar el autobús a la terminal, sin intervención del operador. El alcance de la transmisión debe ser al menos 70 metros.

El punto inicial para el desarrollo del trabajo fue determinar el mecanismo de adquisición y registro de coordenadas GPS. Se examinaron dos alternativas: usando un dispositivo móvil o usando un navegador satelital. La primera alternativa, además del dispositivo móvil, requiere la aplicación GPS Tracks de Google [2, 3], la cual tiene costo de \$3.99 USD, para que las coordenadas registradas puedan importarse en otra aplicación, como Google Earth, para graficarlas. Esta alternativa no se usó en el trabajo realizado porque requiere que en cada unidad se instale un teléfono móvil con contrato de renta y la aplicación instalada, lo cual aumenta considerablemente el costo del sistema y adicionalmente el operador tendría que descargar manualmente en la computadora de la terminal las coordenadas GPS registradas. La segunda alternativa es utilizar un navegador satelital que registre las coordenadas GPS de una ruta en una memoria SD. En este caso existen varios fabricantes de navegadores, todos con funcionalidades básicas similares, por ejemplo, un navegador confiable y robusto comúnmente usado en registro de coordenadas es el GPS GARMIN NUVI [4, 5, 6]. Los navegadores GPS no necesitan una aplicación adicional y su costo es \$300.00 USD en promedio. No se usó un navegador en este trabajo principalmente por su costo y porque también necesitaría intervención adicional del operador del autobús para acceder a la información almacenada en la memoria SD. Por otra parte, existen soluciones de este tipo desarrolladas para entornos particulares que no aplican para la necesidad planteada en este trabajo, como por ejemplo la aplicación Dejabus [7] creada por la Universidad de Colima. Dejabus es una aplicación gratuita que se ejecuta en un dispositivo móvil para monitorear y estimar la hora de llegada de autobuses de transporte público en paradas establecidas. Esta aplicación hace

uso de un sistema, residente en un servidor en Dallas, Texas, que monitorea los receptores GPS instalados en los autobuses.

No existe un sistema comercial que cumpla con el requerimiento y objetivo solicitado por la empresa de autobuses, por lo que se determinó desarrollar un sistema electrónico instalado en cada autobús que utilice un módulo GPS y proporcione las coordenadas GPS de la ubicación actual de la unidad. Estas coordenadas se registran en una memoria SD y son transmitidas automáticamente a la computadora de la oficina de forma inalámbrica al llegar el autobús a la terminal. En la computadora las coordenadas se almacenan en un archivo de texto que posteriormente es suministrado a las aplicaciones que se ejecutan en ella. La contribución y ventajas del sistema realizado son las siguientes: el costo es mucho menor al de soluciones existentes, ya que no se necesitan las coordenadas de la ruta en tiempo real, no requiere intervención del operador para acceder a las coordenadas de la ruta y, al usar como tecnología inalámbrica de comunicación ZigBee, tiene la ventaja que su alcance es 100 metros. Como valor agregado, el sistema cuenta con un botón de alarma, que al ser activado envía un mensaje de texto y ubicación de la unidad a un teléfono móvil. Para seleccionar los componentes adecuados del sistema de forma tal que cumpla con las funcionalidades requeridas se investigaron los últimos avances tecnológicos relacionados con los distintos módulos que lo componen. La investigación realizada incluyó las siguientes tecnologías: GPS, almacenamiento en memorias SD, reloj de tiempo real, GSM y ZigBee.

### **Sistema GPS**

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de posicionamiento por satélites desarrollado por el Departamento de la Defensa de los EU (DoD), diseñado para requerimientos de navegación y posicionamiento precisos con fines militares [8]. En la actualidad es una herramienta importante para aplicaciones de navegación, posicionamientos de puntos en tierra, mar y aire [9]. El GPS está basado en un segmento espacial compuesto por una constelación de satélites de navegación que orbitan la Tierra a una altitud de cerca de 12,000 millas (20,000



kilómetros). La constelación consiste en 29 satélites operativos con 3 de respaldo. Los satélites del GPS transmiten dos señales de radio de baja potencia, llamadas L1 y L2. Cada señal GPS contiene los tres componentes de información siguientes: el código pseudo-aleatorio, los datos de efemérides de satélite y los datos de almanaque. El código pseudo-aleatorio identifica al satélite que transmite la señal. Los datos de efemérides de satélite proporcionan información sobre la ubicación del satélite en cualquier momento. El almanaque contiene información sobre el estado del satélite y la fecha y hora actuales [10]. Las posiciones se obtienen mediante la determinación de las distancias a los satélites visibles. Este proceso se conoce como tri-lateración. El momento de la transmisión de la señal en el satélite se compara con el momento de la recepción en el receptor. La diferencia de estos dos tiempos indicará el tiempo que le toma a la señal de viajar desde el satélite al receptor. Si se multiplica el tiempo de viaje por la velocidad de la luz, se puede obtener el rango o distancia con respecto al satélite. La repetición del proceso desde tres satélites permite determinar la posición de dos dimensiones en la Tierra (longitud y latitud). Un cuarto satélite es necesario para determinar la tercera dimensión, es decir la altura [11].

## **Memorias SD**

Las memorias SD son pequeñas tarjetas con formato SD (Secure Digital) ampliamente usadas en una variedad de dispositivos como: teléfonos móviles, cámaras de video y fotográficas, computadoras, equipos de sonido, entre muchos otros [12]. Su capacidad de almacenamiento es de 1 a decenas de GB, con respecto a sus dimensiones, básicamente existen tres tamaños como se indica en la tabla 1 [13].

Tabla 1 Dimensiones de memorias SD.

<b>Tipo de memoria</b>	<b>Dimensiones</b>
Memoria SD tradicional	32 mm x 24 mm x 2.1 mm
Memoria Mini SD	20 mm x 21.5 mm x 1.4 mm
Memoria Micro SD	11 mm x 15 mm x 1 mm

## **Reloj de tiempo real**

Un reloj en tiempo real (RTC) es un reloj de un sistema digital, incluido en un circuito integrado, que mantiene la hora actual. Los RTC están presentes en la mayoría de los sistemas electrónicos que necesitan obtener y almacenar la hora y fecha exacta. El término se usa para evitar la confusión con los relojes ordinarios de hardware, que sólo son señales que sincronizan circuitos digitales, y no cuentan el tiempo en unidades humanas [14]. Usar un RTC tiene beneficios como: bajo consumo de energía (importante cuando está funcionando con una pila), permite liberar de trabajo al módulo principal para que pueda dedicarse a tareas más críticas y algunas veces es más preciso que otros métodos.

## **GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles)**

El Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM) es un sistema de telefonía móvil digital, que opera en diferentes bandas de frecuencia. Las bandas más conocidas son de las frecuencias de 900 MHz (GSM 900), 1,800 MHz (GSM 1800), 1,900 MHz y 2,100 MHz, trabajan en función de sus propias tarjetas de memoria llamadas SIM (Subscriber Identity Module), que proporcionan la identidad del usuario en la red con su número de teléfono asignado. GSM usa TDMA (cada canal de RF de 200 kHz es dividido en 8 períodos de tiempo, permitiendo de este modo 8 conversaciones simultáneas en la misma frecuencia de radio; también permite dividir ese tiempo en 16 secciones (time-slots) con un régimen de datos inferior (half-rate). En frecuencias bajas, para GSM se asignan 50 MHz de ancho de banda, 25 MHz para el enlace de subida (uplink) y otros 25 MHz para el enlace de baja (downlink), es decir 125 canales de subida y otro tanto de bajada; en frecuencias altas se asignan 100 MHz, 50 MHz para uplink y 50 MHz para downlink, resultando en el doble de canales disponibles [15]. El servicio más importante y utilizado que presenta GSM son los mensajes cortos SMS. El servicio de mensajes cortos SMS permite el envío y recepción de mensajes breves de texto de 160 caracteres máximo. Al recibir el mensaje además del texto se obtiene una serie de datos como: el remitente y la hora y fecha de recepción. El SMS usa un protocolo sin conexión ya que cuando se trasmite un mensaje no se

produce ninguna conexión directa entre el terminal que envía y el que recibe. Para el envío de un SMS, es necesario que el dispositivo GSM tenga configurado el número telefónico del centro de mensajes propio del operador. Una vez enviado el SMS es transmitido desde la red hacia el teléfono destino. Si el destino permanece apagado o fuera de cobertura, la red intentará enviar el mensaje durante 48 horas, pasado este lapso de tiempo el SMS no se entrega [16, 17].

### **Tecnología ZigBee**

La tecnología ZigBee se basa en el nivel físico y el control de acceso al medio (MAC) definida en el estándar IEEE 802.15.4. ZigBee trabaja en la banda de uso industrial, científico y médico (ISM); 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2.4 GHz en el resto del mundo. Sin embargo, los diseñadores de dispositivos con transceptores ZigBee generalmente usan la banda de 2.4 GHz, por ser libre en todo el mundo. Una red ZigBee está compuesta por nodos [18]. El nodo ZigBee más completo requiere cerca del 10% del hardware de un nodo Bluetooth o Wi-Fi típico; esta cifra se reduce al 2% para los nodos más sencillos. El tamaño del código para utilizar un nodo ZigBee es aproximadamente 50% del tamaño de Bluetooth. Existen los siguientes tres tipos de nodos ZigBee según su papel en la red: 1. Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC). El tipo de dispositivo más completo. Debe existir al menos uno por red. Su función es controlar la red y los caminos que deben seguir los dispositivos para conectarse entre ellos. 2. Router ZigBee (ZigBee Router, ZR). Interconecta dispositivos separados en la topología de la red y proporciona un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario. 3. Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED) [19]. Cuenta con la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos, tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato que los dos tipos anteriores. Un nodo ZigBee puede encontrarse en estado de reposo la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías.

## 2. Desarrollo

La metodología usada para el diseño de este trabajo fue dividirlo en dos circuitos: el primer circuito se encuentra instalado en el autobús y el segundo circuito está ubicado en la oficina central de la terminal. A continuación, se determinaron los módulos que componen a cada circuito y por último se seleccionaron los componentes adecuados a cada módulo. En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques del sistema. El circuito instalado en el autobús se compone de seis módulos: módulo RTC, módulo de memoria SD, módulo GSM, módulo GPS, microcontrolador y transceptor ZigBee. El circuito de la oficina central está compuesto por dos módulos: transceptor ZigBee e interface de usuario. La operación y características de funcionamiento de cada módulo se explican a continuación.

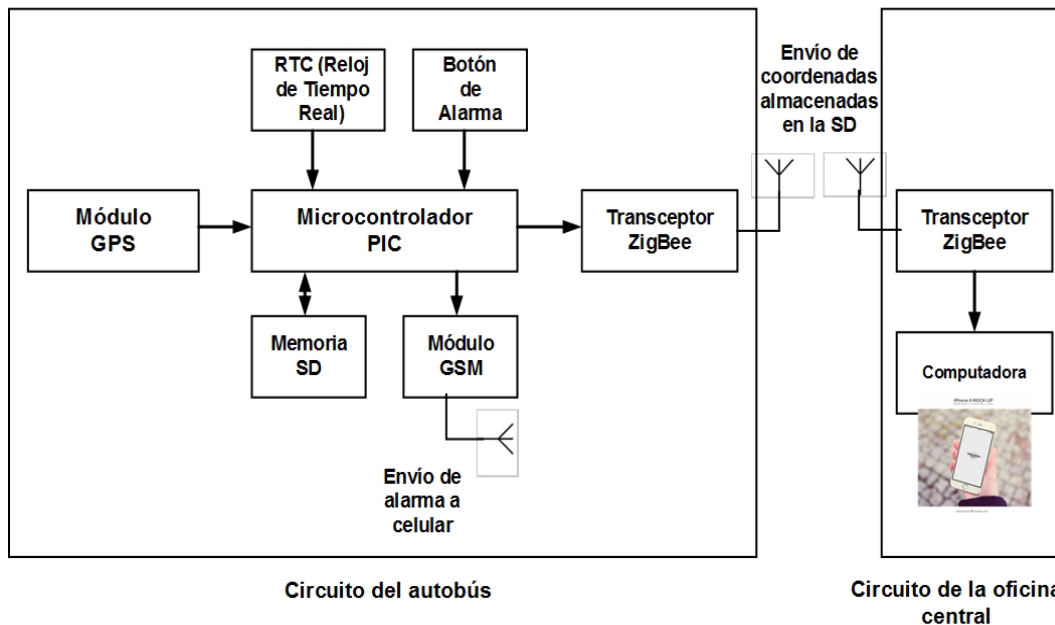


Figura 1 Diagrama de bloques del sistema.

### Circuito del autobús

#### Módulo RTC

En este módulo se usó el circuito RTC DS1307 como el mostrado en la figura 2, el cual es un reloj de tiempo real de bajo poder que proporciona la hora y fecha calendario en formato BCD y cuenta con memoria NV SRAM de 56 bytes. Se

utilizó este circuito para contar con hora y fecha exacta y confiable que se registra en la información enviada al módulo de memoria SD. El circuito RTC DS1307 se comunica con el microcontrolador usando el protocolo I<sup>2</sup>C, de manera que direcciones y datos se transfieren de forma serie usando el bus bidireccional I<sup>2</sup>C. La información de hora y fecha entregada por este circuito está integrada por segundos, minutos, horas, día, mes y año. El último día del mes está ajustado a los meses con menos de 31 días. El DS1307 se configuró como esclavo en el bus I<sup>2</sup>C y sus terminales SDA y SCL se conectaron a las terminales del SDA1 y SCL1 del primer puerto serie síncrono del microcontrolador, configurado en modo I2C. Para obtener la hora y fecha, la programación del microcontrolador transmite el comando de inicio al DS1307, seguido por el código de identificación del dispositivo y la dirección de un registro. Los registros que contienen la información de hora fecha son leídos secuencialmente hasta enviar el comando de terminación.

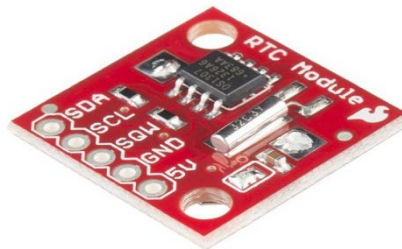


Figura 2 Módulo RTC DS1307.

### **Módulo de memoria SD**

Este módulo está integrado por una tarjeta de memoria SD y un contenedor SD. Las tarjetas de memoria SD (Secure Digital Cards) se usan para almacenar información en una variedad de dispositivos electrónicos como cámaras fotográficas y de video, teléfonos, computadoras y equipos de sondeo. Su tamaño varía desde 1 a 128 GB. La tarjetas SD pueden trabajar en uno de tres modos de operación; modo SD de un bit, modo SD de cuatro bits y modo SPI (Serial Peripheral Interface Bus). En este trabajo se usó el modo SPI para comunicar la memoria SD con el microcontrolador porque es el más sencillo, flexible de usar y es el soportado por la mayoría de microcontroladores. Para conectar la memoria

SD al segundo puerto serie síncrono del microcontrolador, configurado en modo SPI, se utilizó un contenedor HR845CT-ND como el mostrado en la figura 3. El sistema de archivos usado en la memoria SD para almacenar la información proporcionada por el autobús es de formato FAT-16.



Figura 3 Contenedor de la memoria SD.

### **Módulo GSM**

Este módulo está compuesto por un modem GSM. Los módems GSM se usan ampliamente en sistemas de seguridad, alarmas y monitoreo para proporcionar acceso a la red telefónica móvil para realizar llamadas y enviar mensajes de texto. La información que transmiten son ubicaciones de GPS, alertas y estado de variables de procesos. En este trabajo, la función de este modem es enviar un mensaje de alerta cuando el operador del autobús active el botón de alarma. El mensaje se envía al teléfono móvil de la base del autobús configurado en la programación del microcontrolador.

El modem GSM usado en este módulo fue el SIM300 como el indicado en la figura 4. El SIM300 se conecta a la red de cualquier operador GSM usando la tarjeta o chip correspondiente como lo hace un teléfono móvil con su número de teléfono asignado. Para enviar el mensaje SMS de alerta, la comunicación serie entre el microcontrolador y el modem se lleva a cabo por el puerto EUSART1 configurado a 9600 bps. El protocolo de comunicación entre el modem y el microcontrolador es por medio de comandos AT. Para enviar el mensaje de texto, la programación del microcontrolador sigue tres fases en el envío del comandos AT: AT+CMCF=1, AT+CMGS=numero-de-teléfono y mensaje de texto terminado con Cntrl+Z.

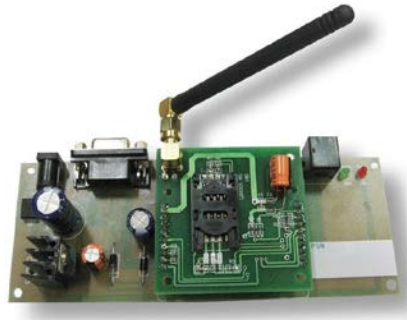


Figura 4 Modem SIM300.

### Módulo GPS

Para implantar este módulo se usó un circuito RXM-GPS-SR como el mostrado en la figura 5. Este circuito es un receptor GPS compacto con antena integrada de bajo consumo de corriente que puede adquirir coordenadas de 20 satélites simultáneamente en pocos segundos. La información de salida que entrega este circuito usa el formato del protocolo serie estándar NMEA. El RXM-GPS-SR se comunica con el microcontrolador por medio de sus terminales TX y RX. Estas terminales se conectaron, respectivamente, a una línea del Puerto A del microcontrolador para realizar la comunicación serie configurada a 9600 bps. Para lograr esta velocidad se usó como reloj el temporizador 0 del microcontrolador.



Figura 5 Módulo GPS RMX-GPS-SR.

### Microcontrolador

El microcontrolador usado fue un PIC18F86J60. Se utilizó este microcontrolador principalmente porque cuenta con los siguientes recursos que permitieron cumplir las funciones del sistema: memoria de programa flash de 64 kB, memoria SRAM de 3808 Bytes, dos puertos serie síncronos (Master Synchronous Serial Port-MSSP) configurables en modos SPI e I<sup>2</sup>C, dos puertos EUSART, cinco temporizadores y 55 líneas de entrada/salida.

## **Transceptor ZigBee**

Este módulo está compuesto por un circuito XBee Serie 2 como el mostrado en la figura 6. El XBee Serie 2 recibe la información de la ruta seguida por el autobús enviada por el microcontrolador y la transmite a la oficina central de la terminal de forma inalámbrica. El XBee de este módulo se configuró como ruteador. El puerto EUSART2 del microcontrolador se conectó al puerto UART del XBee usando una velocidad de 230.4 kbps.



Figura 6 Módulo XBee Serie 2.

## **Circuito de la oficina central**

### **Transceptor ZigBee**

Este módulo está compuesto por un circuito XBee Serie 2 y un convertidor de niveles RS232. El XBee Serie 2 recibe la información de la ruta seguida por el autobús a su llegada a la terminal y la enviada a la interface de usuario. El XBee de este módulo se configuró como ruteador. La salida del puerto UART del XBee se conectó a un convertidor de niveles RS232 MAX 232. El MAX 232 convierte la salida del puerto serie UART a niveles del estándar RS232 para usar un cable de comunicación RS232-USB y transmitir a la computadora la información del puerto UART.

### **Interface de usuario**

En la computadora personal se realizó, en lenguaje Visual C, la interface de usuario que almacena, en un archivo de texto plano diario, las coordenadas de rutas seguidas por cada autobús. En la figura 7 se muestra la ventana principal de la interface de usuario, se puede apreciar que en primer término permite



seleccionar el archivo que contiene las coordenadas de la ruta seguida por la unidad un día específico.

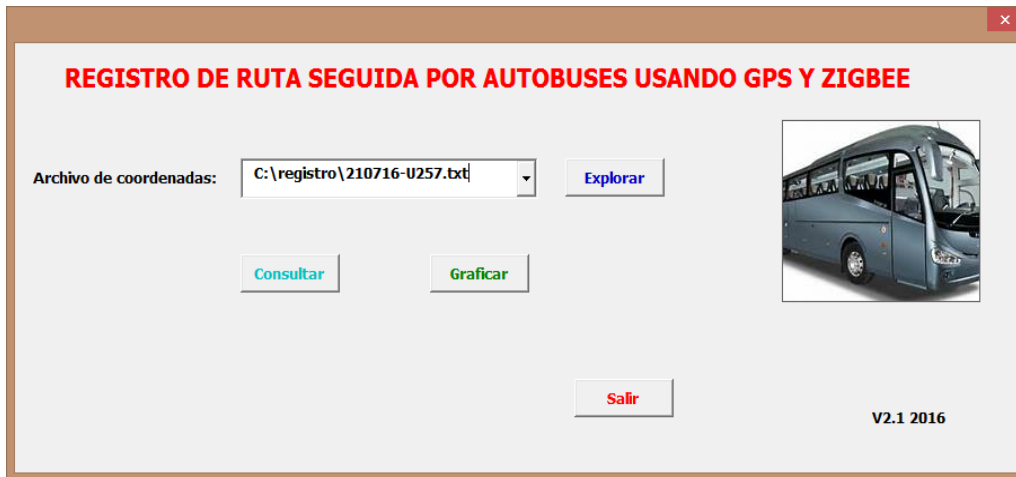
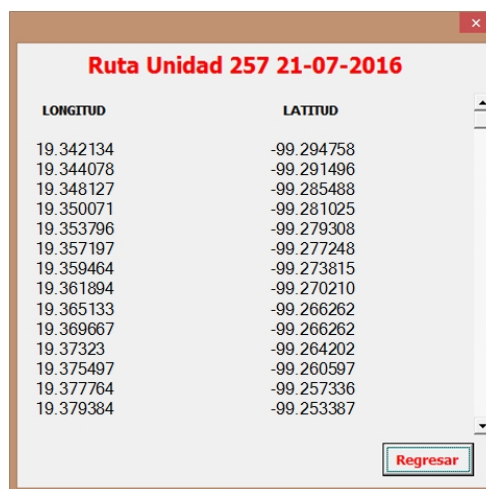


Figura 7 Interface de usuario del sistema.

El usuario puede consultar (figura 8) o graficar (figura 9), invocando la aplicación Google Earth, las coordenadas almacenadas en el archivo seleccionado. La información de coordenadas puede usarse en cualquier aplicación de análisis y optimización que se ejecute en una computadora. La programación de la interface de usuario configura también el puerto USB de la computadora, donde se conecta un módulo XBee para poder llevar a cabo la comunicación con el microcontrolador del sistema digital del autobús.



LONGITUD	LATITUD
19.342134	-99.294758
19.344078	-99.291496
19.348127	-99.285488
19.350071	-99.281025
19.353796	-99.279308
19.357197	-99.277248
19.359464	-99.273815
19.361894	-99.270210
19.365133	-99.266262
19.369667	-99.266262
19.37323	-99.264202
19.375497	-99.260597
19.377764	-99.257336
19.379384	-99.253387

Figura 8 Coordenadas de ruta de un autobús mostradas en la interface de usuario.



Figura 9 Gráfica de ruta seguida por un autobús mostrada en la interface de usuario.

### 3. Resultados

Se construyeron cinco circuitos del autobús con la misma arquitectura. Cada circuito se instaló en la parte inferior izquierda del tablero de la unidad como se muestra en la figura 10. El costo aproximado del sistema electrónico fue de \$80 USD. Se realizaron pruebas con rutas de diferente longitud en el Área Metropolitana de la Ciudad de México y hacia algunos estados de México. Esto dio como resultado que se realizaran ajustes en la comunicación del RTC y la memoria SD con el microcontrolador, ya que la ruta graficada no era la seguida. Las pruebas más importantes fueron al registrar coordenadas de rutas largas y transmitir el archivo desde el autobús al circuito de la oficina central. Por ejemplo, la ruta México-Tijuana (5,700 km) generó un archivo de 100 kB. El transceptor XBee se puede comunicar con el UART del microcontrolador a velocidades de 1.2 a 230.4 kbps y transmitir información por RF a 250 kbps.

Inicialmente se configuró el UART a 1.2 kbps, la transmisión del archivo de 100 KB se realizó en 11 segundos, posteriormente se incrementó la velocidad gradualmente hasta llegar a la máxima de 230.4 kbps y el tiempo de transmisión disminuyó hasta 5 segundos como se indica en la gráfica de la figura 11.



Figura 10 Ubicación del circuito del autobús.

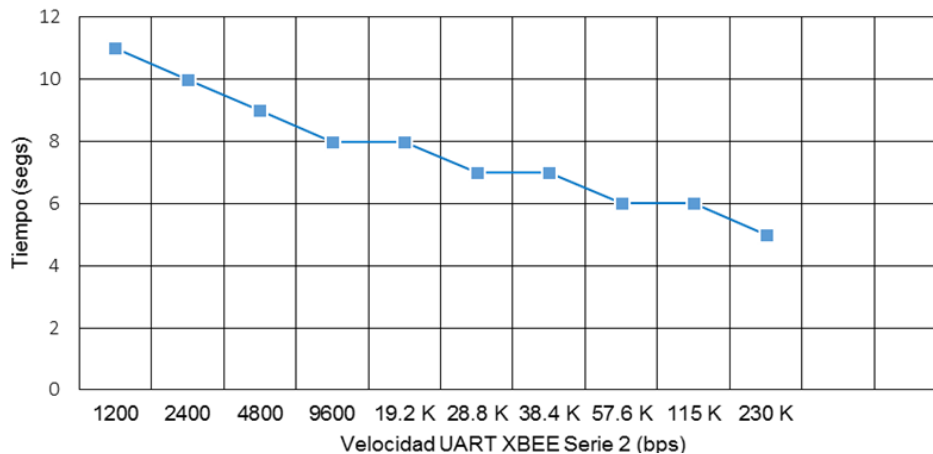


Figura 11 Tiempo de transmisión de archivo de 100 kB entre el autobús y oficina central.

Configurando el USART a 230.4 kbps la transmisión del archivo de 100 kB (un poco más de 800 Kbits) debería tardar 3 segundos. Tardó 5 segundos porque la velocidad del USART del circuito XBee es menor a la velocidad de la salida RF y por la existencia de tiempos de conexión en la comunicación Bluetooth como lo indica el manual del fabricante. Para transmitir el archivo de coordenadas en menor tiempo posible se configuró la velocidad del USART del dispositivo XBee a 230.4 kbps.

Se realizaron también pruebas de transmisión entre el circuito del autobús y el circuito de la oficina central a diferentes distancias. El resultado que se obtuvo fue

un alcance de 102.5 metros con línea de vista, un poco superior a los 100 metros especificados por el fabricante del transceptor XBee. Finalmente, se probó la activación del botón de alarma, recibándose el mensaje en el teléfono móvil configurado. Como se esperaba, en regiones donde no existe señal celular, sobre todo en lugares de difícil acceso, se recibió el mensaje hasta encontrar señal en celular el módulo GSM.

#### **4. Discusión**

El diseño e implantación de este sistema permite obtener datos confiables que pueden usarse en aplicaciones de optimización de rutas, creación de nuevas rutas, solución de imprevistos en el recorrido de un autobús, tiempos definidos del recorrido y una mayor movilidad. La solución resultante no es para monitorear en tiempo real la ruta de un autobús y por tanto su costo es mucho menor a las existentes de tiempo real. Los beneficios del sistema desarrollado son los siguientes: la inversión que realiza el usuario es el costo del sistema electrónico y su instalación, no hay una renta, el sistema puede usarse por cualquier empresa que no requiera seguimiento de rutas en tiempo real, ya que las coordenadas pueden ser utilizadas por diversas aplicaciones a las que se les suministra esta información en forma de texto, no existe actualmente una aplicación como la implantada en este trabajo donde la transmisión inalámbrica de información desde el autobús a una computadora tenga alcance de 100 metros. El tiempo en la transmisión de archivos de coordenadas, mayores a 100 KB, no representa un problema, ya que el tamaño del archivo es resultado de rutas demasiado largas en el país, las cuales no son recorridas continuamente. Consumir 5 segundos para transmitir el archivo está dentro del tiempo usado por el autobús al entrar a la terminal. Con respecto a la activación del botón de alerta, cuando se tenga un problema en el autobús en zonas donde no exista señal celular, por ejemplo, fallas de motor, llantas o accidente, una mejora a este sistema podría ser incorporar un teléfono satelital en plan de renta mínima que solo se use en situaciones de envío de mensajes de emergencia.

## 5. Conclusiones

Se obtuvo un sistema compacto, económico y fácil de instalar que cumple los requisitos solicitados y que actualmente está en operación. Se está planeando desarrollar la segunda versión que incorpore el monitoreo en tiempo real de rutas urbanas, incorporando al sistema electrónico del autobús transceptores de tecnología LoRa (Long Range). Estos transceptores de reciente creación tienen alcance de 50 kilómetros, suficientes para rutas dentro de la misma ciudad. La ventaja principal del sistema será que es en tiempo real y el usuario no necesitará pagar la renta de un servicio satelital para el monitoreo.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] K. Sujatha, P. V. Nageswara, K. J. Sruthi, "Design and development of android mobile based bus tracking system". 2014 First International Conference on Networks & Soft Computing (ICNSC). Guntur. 19-20 Aug. 2014. Pp. 231-235.
- [2] J. Y. Lin, B. K. Yang, T. A. Do, "The Accuracy Enhancement of GPS Track in Google Map". 2013 Eighth International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA). Compiègne. 28-30 Oct.
- [3] <https://itunes.apple.com/us/app/gps-tracks/id425589565?mt=8>. Feb 2016.
- [4] L. Singla, P. Bhatia, "GPS based bus tracking system". 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4). Indore. 10-12 Sept. Pp.1-6. 2015.
- [5] K. Sujatha, P. V. Nageswara, K. J. Sruthi, "Design and development of android mobile based bus tracking system". 2014 First International Conference on Networks & Soft Computing (ICNSC). Guntur. 19-20 Aug. 2014. Pp. 231-235.
- [6] GPS GARMIN NUVI 15xH/15xL Technical Specifications. Garmin Ltd. UK. December 2009.
- [7] Dejabus, tu destino sin esperas. <http://www.dejabus.com/>. Febrero 2016.

- [8] J. M. Hu, J. Li, G. H. Li, "Automobile Anti-theft System Based on GSM and GPS Module". 2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS). Tianjin. 1-3 Nov. 2012. Pp. 199-201.
- [9] N. Guan, H. Chiba, Y. Yamaguchi, "A flat roof automobile antenna module for LTE, GPS and SDARS applications". 2014 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). Palm Beach. 3-9 Aug. 2014. Pp. 11-14.
- [10] C. Chen, D. Zhang, N. Li, "B-Planner: Planning Bidirectional Night Bus Routes Using Large-Scale Taxi GPS Traces". IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol 15. Issue 4. 2014. Pp. 1451-1465.
- [11] C. V. Suresh-Babu, R. P. Rubajini, K. Pooja-Devi, "An Integrated smart system for accident - avoidance in four wheelers by using GSM and GPS Module". 2013 Fifth International Conference on Advanced Computing (ICoAC). Chennai. 18-20 Dec. 2013. Pp. 432-438.
- [12] P. Zhou, T. Wang, X. Wang, "Hardware implementation of a low power SD card controller". 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Guilin. 5-8 Aug. 2014. Pp. 158-161.
- [13] S. Mateski, Z. Anastasovski, "Digital sound recorder with ARM microcontroller and SD card". 2012 20th Telecommunications Forum (TELFOR). Belgrade. 20-22 Nov. 2012. Pp. 1741-1743.
- [14] Y. W. Bai, H. C. Chen, "An adjustable design for the Real Time Clock of high-end server systems". CCECE 2008. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2008. Niagara Falls. ON. 4-7 May. 2008. Pp. 183-188.
- [15] B. Janarthanan, T. Santhanakrishnan, "Real time metropolitan bus positioning system design using GPS and GSM". 2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE). Coimbatore. 6-8 March 2014. Pp. 1-4.
- [16] U. Farooq, T. Haq, M. Amar, "GPS-GSM Integration for Enhancing Public Transportation Management Services". 2010 Second International

- Conference on Computer Engineering and Applications (ICCEA). Bali Island. 19-21 March 2010. Pp. 142-147.
- [17] M. Yuchun, H. Yinghong, Z. Kun, "General Application Research on GSM Module". 2011 International Conference on Internet Computing & Information Services (ICICIS). Hong Kong. 17-18 Sept. 2011. Pp. 525-528.
- [18] C. Yuehong, X. Yong, Y. Xiao, "Wireless ZigBee transceiver for smart meter reading system". 2012 IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM). Wuhan. 18-20 Sept. 2012. Pp. 1-6.
- [19] J. Gil, J. H. Kim, C. S. Kim, "A Fully Integrated Low-Power High-Coexistence 2.4-GHz ZigBee Transceiver for Biomedical and Healthcare Applications". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Volume 62. Issue 9. 2014. Pp. 1879-1889.

## **7. Autores**

M.C. José Ignacio Vega Luna obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones de microcontroladores, UNIX y sistemas de alta disponibilidad. Desde 1985 es Profesor Titular de carrera en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Mario Alberto Lagos Acosta es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Asociado en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Gerardo Salgado es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores y microcontroladores. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

Ing. Víctor Noé Tapia Vargas es Ingeniero en Electrónica por la UAM-Azcapotzalco, cuenta con el 100% de créditos de la Maestría en Ciencias de la Computación en la UAM-Azcapotzalco. Sus áreas de especialización y trabajo son: aplicaciones con microprocesadores, microcontroladores y robótica. Actualmente es Profesor Titular en la UAM-Azcapotzalco.

# **CARGADOR DE APLICACIONES PARA EL MICROCONTROLADOR ATMEGA328P BUSCANDO APROVECHAR LOS RECURSOS DE UNA TARJETA ARDUINO**

***Felipe Santiago Espinosa***

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica  
*fsantiag@mixteco.utm.mx*

***Zenón Belarmino Martínez Cruz***

Universidad Tecnológica de la Mixteca, Instituto de Electrónica y Mecatrónica  
*zenon.mn.23@gmail.com*

## **Resumen**

El desarrollo de aplicaciones con microcontroladores requiere de la continua programación del dispositivo. Generalmente el MCU se retira del sistema para ser grabado aunque también es posible su programación “*in system*”, con lo que se ahorra tiempo y evita el daño de pines. Con Arduino se simplificó la curva de desarrollo porque facilita la programación desde su IDE y cuenta con numerosas bibliotecas para el manejo de periféricos. La tarjeta Arduino es soportada por un AVR y estos MCU tienen dos secciones en su memoria de código: arranque y aplicación. El MCU de Arduino tiene un cargador que facilita la programación de aplicaciones. Sin embargo, desde Arduino no se realiza un acceso a registros de manera que los recursos suelen usarse ineficientemente y se complica la ejecución concurrente de tareas que se consigue mediante interrupciones. Los desarrolladores experimentados prefieren usar un microcontrolador independiente. Buscando aprovechar el hardware de Arduino, se desarrolló un cargador para un ATmega328P, un programa que desde la sección de arranque facilita el grabado de la sección de aplicación sin requerir un programador adicional. Con ello, es



posible trabajar en ensamblador o C y realizar las descargas en el MCU por medio de una aplicación realizada en Java, la cual complementa al cargador.

**Palabra(s) Clave(s):** Arduino, aplicación en Java, auto-programación, cargador.

## 1. Introducción

Un microcontrolador o MCU (*Micro-Controller Unit*) es un Circuito Integrado VLSI que contiene una CPU, memoria para código, memoria para datos, temporizadores, fuentes de interrupción y otros recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones. Un MCU incluye los elementos necesarios para ser considerado como una computadora en un chip pero frecuentemente no es tratado como tal, ya que su uso típico consiste en el desempeño de funciones de “control” interactuando con el “mundo real” para monitorear condiciones (a través de sensores) y en respuesta a ello, encender o apagar dispositivos (por medio de actuadores) [1].

Los microcontroladores están enfocados a aplicaciones de propósito específico, como electrodomésticos, controles remotos, equipo de audio, juguetes, etc., en donde se deben cubrir requerimientos de costo, consumo de potencia y espacio más que una demanda de cómputo exhaustivo [2]. Las características de los MCU los hacen ideales para sistemas embebidos autónomos, así como para sistemas a medida que son parte de un proceso de automatización; por lo que su estudio es fundamental durante la formación de profesionistas en las áreas de electrónica, mecatrónica o afines.

Cuando se desarrollan sistemas con base en un MCU, en algún punto del proceso se debe programar al dispositivo, esto implica retirarlo del sistema para llevarlo a un grabador o bien, conectar el grabador en algún puerto del sistema y realizar la descarga del nuevo programa (programación *in system*). En ambos casos se requiere de un hardware de programación externo al sistema.

Para simplificar el desarrollo de sistemas con microcontroladores, en el Instituto de Diseño e Interacción IVREA se creó a Arduino, una herramienta simple de prototipado rápido, dirigida a estudiantes sin fundamentos en electrónica y programación. Arduino es una plataforma *open-source* basado en hardware y

software de fácil uso, las tarjetas pueden leer entradas (sensores, botones, texto, etc.) y generar salidas (activando un motor, encendiendo un LED, publicando mensajes, etc.) [3]. Las tareas se programan con el envío de instrucciones, desde el IDE de Arduino se realiza la codificación y descarga en el microcontrolador de la tarjeta, sin requerir hardware adicional.

Actualmente Arduino es usado por una comunidad mucho más amplia, sus tarjetas han evolucionado para adaptarse a nuevas necesidades y proyectos, los *shields* o módulos de expansión se conectan a la tarjeta base para ampliar sus capacidades. Comercialmente se encuentran disponibles *shields* para el manejo de motores, lectura de sensores, comunicaciones con diferentes protocolos, interfaces alfanuméricas y gráficas, etc. En muchos casos se mantiene la misma filosofía: deben ser fáciles de montar y de bajo costo.

Arduino es muy conveniente para el desarrollador con poca experiencia porque puede realizar proyectos en poco tiempo sin estudiar la arquitectura del microcontrolador; además, por el extenso número de bibliotecas para periféricos, es posible emplear *shields* desconociendo la forma en cómo operan los dispositivos incluidos [4].

Las tarjetas están basadas en microcontroladores AVR y estos dispositivos tienen una variedad de recursos, por ejemplo, las versiones Arduino Nano, Micro, UNO y LilyPad incluyen un ATmega328P, este dispositivo tiene los recursos que se resumen en la tabla 1 [5]. La memoria de código se divide en dos secciones, una sección de arranque y otra de aplicación. Arduino hace uso de esta característica para dejar un programa residente en la sección de arranque, mediante el que se realiza la descarga de programas que se ubicarán en la sección de aplicación.

En la etapa inicial de la formación de un ingeniero electrónico o mecatrónico es válido y conveniente el uso de herramientas como Arduino; sin embargo, en la medida en que su formación avanza, es necesario el conocimiento de la organización de los MCU para que realice sistemas que exijan el máximo desempeño del chip. El desarrollador debe tener la libertad de usar las interrupciones generadas por los recursos internos para que haga dos o más

tareas en forma concurrente y realice sistemas embebidos con operación en tiempo real.

Tabla 1 Características del microcontrolador ATmega328.

Recurso	Disponibilidad	Recurso	Disponibilidad
Flash (código)	32 kB	Interfaz TWI	1
EEPROM (datos)	1 kB	ADC de 10 bits	1 con 6 canales
SRAM (datos)	2 kB	Comparador Analógico	1
Terminales I/O	23	Watchdog Timer	1
Frec. Máxima	20 MHz	Oscilador interno	1 MHz/8 MHz
Voltaje de Operación	1.8 – 5.5 V	Multiplificador por HW	Si
Temporizador (16 bits)	1	Interrupciones	26
Temporizador (8 bits)	2	Int. Externas	2
Canales PWM	6	Int. Por cambio en pines	3
Reloj de tiempo real	1	Programación <i>in system</i>	Si
USART	1	Auto programación	Si
SPI Maestro/Esclavo	1	Interfaz <i>Debug Wire</i>	Si

Esto implica programar en un nivel más bajo al propuesto por Arduino y emplear lenguaje ensamblador o C, con ambas opciones se realiza un acceso directo a los registros I/O, mediante los cuales se realiza la configuración, control y estado de los recursos internos [1]. El máximo aprovechamiento de un MCU se obtiene con la metodología tradicional en la que se emplea solo al microcontrolador, se codifica y simula antes de descargar, para después programar al MCU, integrar y evaluar al sistema.

Con la finalidad de aprovechar las ventajas de los dos paradigmas, se presenta la implementación de un cargador AVR, un pequeño programa que reside en la sección de arranque del microcontrolador y reemplaza al cargador de arduino. La presencia del cargador facilita la auto-programación del MCU y se auxilia de una aplicación en Java desde donde se selecciona el archivo a descargar. El cargador AVR no introduce código adicional a la aplicación del usuario, el sistema tendrá el mismo desempeño que con el MCU solo. Similar al paradigma tradicional, el desarrollador codifica en C o ensamblador, compila y simula. Una vez generado el código máquina (archivo *HEX*), la aplicación en Java transfiere el código para su grabado en el MCU.

La operación del cargador AVR inicia cuando el sistema se energiza o después de un reset, el cargador espera 15 segundos por una interrupción serial para la descarga de una nueva aplicación, concluida la carga o terminado el periodo, se realiza un salto a la sección de aplicación. Las tarjetas arduino incluyen un adaptador USB-USART, este es aprovechado por el cargador AVR, por lo que no se requiere hardware adicional para la programación de nuevas aplicaciones.

El cargador AVR no es exclusivo para las tarjetas arduino, pero se enfocó a un ATmega328 para aprovechar el hardware de una tarjeta Arduino UNO con los *shields* que para ella se han desarrollado, maximizando el rendimiento al desarrollar en lenguaje C o ensamblador. Un trabajo similar se encuentra disponible en el sitio ATmega32-AVR [6].

## **2. Desarrollo**

Para este trabajo se realizaron dos programas, el cargador que se ubica en la sección de arranque del microcontrolador y el programa en Java que facilita la descarga de aplicaciones. Ambos programas son descritos en las siguientes secciones.

### **El cargador de arranque en el ATmega328**

El cargador proporciona un mecanismo de auto-programación para actualizar el código desde el mismo microcontrolador. Esta característica permite actualizaciones flexibles del software de aplicación usando un programa residente en la memoria flash. En esta sección se describen las características de la memoria flash y los bits de configuración y seguridad (fusibles) que deben modificarse para la adecuada operación del cargador, la configuración de los fusibles se realiza durante la programación del cargador.

### **La memoria flash del ATmega328**

La memoria flash del ATmega328 es de 16 K de palabras de 16 bits, se estructura en páginas de 64 palabras teniendo un total de 256 páginas. El acceso

para el borrado y escritura implica la modificación de una página completa. La lectura es diferente, ésta puede realizarse con un acceso por bytes.

Como previamente se ha citado, la memoria tiene las secciones de arranque y aplicación, el número de páginas para cada sección se determina con los fusibles **BOOTSZ**. En la tabla 2 se exhiben los diferentes tamaños posibles, así como el intervalo de direcciones en cada combinación, una aplicación puede tener acceso al código escrito en la sección de arranque, por medio de llamadas a rutinas o saltos. Los dispositivos son comercializados con **BOOTSZ** = "00", dejando 32 páginas para la sección de arranque.

Tabla 2 Diferentes configuraciones para BOOTSZ en un ATmega328. [1:0]

<b>BOOTSZ 1</b>	<b>BOOTSZ 0</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Arranque</b>	<b>Tamaño (Arranque)</b>	<b>Páginas</b>
1	1	0x0000 – 0x3EFF	0x3F00 – 0x3FFF	256 words	4
1	0	0x0000 – 0x3DFF	0x3E00 – 0x3FFF	512 words	8
0	1	0x0000 – 0x3BFF	0x3C00 – 0x3FFF	1024 words	16
0	0	0x0000 – 0x37FF	0x3800 – 0x3FFF	2048 words	32

La sección de aplicación inicia en la dirección 0 por lo que al energizar al MCU comienza con la ejecución de la aplicación. No obstante, con el fusible **BOOTRST** se consigue que después de un *reset* la CPU inicie su ejecución en la sección de arranque y no en la dirección 0.

Los vectores de interrupción se ubican en las primeras direcciones de la memoria flash por lo que están en la sección de aplicación; sin embargo, modificando al registro **MCUCR** (*MCU Control Register*) se pueden desplazar los vectores de interrupción a la sección de arranque. Los bits de interés son **IVSEL** (*Interrupt Vector Select*) e **IVCE** (*Interrupt Vector Change Enable*), ocupando las posiciones 1 y 0 en el registro **MCUCR**.

Con un 0 en **IVSEL** los vectores de interrupción se ubican al inicio de la memoria flash y con un 1 se desplazan al inicio de la sección de arranque, cuya dirección depende de los fusibles **BOOTSZ** (tabla 2). El bit **IVCE** es un habilitador que evita cambios no deseados en la ubicación de los vectores de interrupción. Cualquier ajuste requiere la puesta en alto de **IVCE** y dentro de los 4 ciclos de reloj

siguientes se debe escribir el valor deseado en **IVSEL**. La programación de **BOOTRST** es independiente al estado del **IVSEL**, un programa puede iniciar su ejecución en la sección de arranque, conservando los vectores de interrupciones al inicio de la memoria flash. Los vectores de interrupción se pueden mover en tiempo de ejecución.

### Comportamiento del cargador

El MCU inicia ejecutando al cargador (ubicado en la sección de arranque), el cual mueve los vectores de interrupción y con el apoyo del temporizador 1 espera durante 15 segundos por un posible comando desde una PC vía puerto serie. Durante ese periodo el MCU puede recibir y atender comandos para el borrado del dispositivo, la lectura de la aplicación actual o la escritura de una nueva aplicación; terminado el periodo sin más comandos, el cargador regresa el vector de interrupciones a su ubicación original, los registros modificados a su valor original y bifurca la ejecución a la dirección 0 para iniciar con el programa de aplicación. En la figura 1 se muestra el flujo que sigue el cargador de arranque.

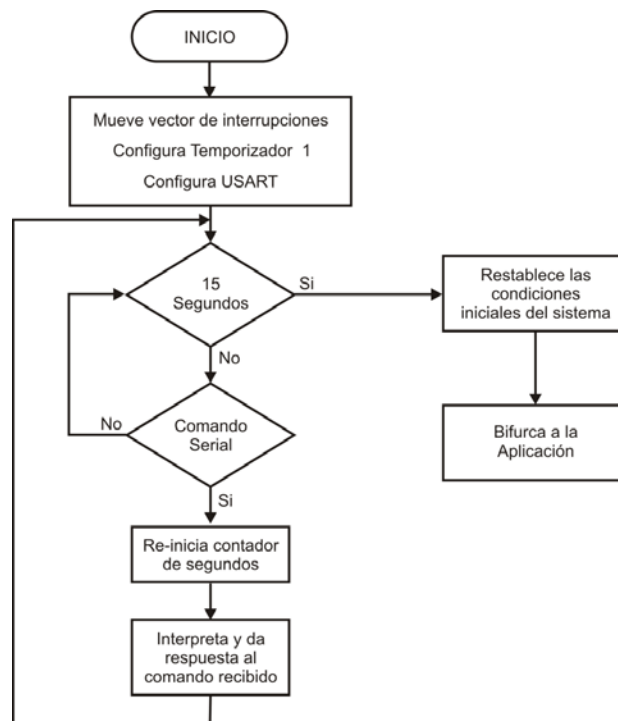


Figura 1 Diagrama de flujo del Cargador AVR.

## Restricciones de acceso a la memoria flash

El acceso a la memoria flash se realiza con instrucciones de carga (**LMP**, *Load Program Memory*) y almacenamiento (**SPM**, *Store Program Memory*). Los MCU se comercializan sin restricciones en el uso de estas instrucciones, es decir, el contenido de las dos secciones se puede modificar con secuencias de código ubicadas en cualquier sección. Sin embargo, con los fusibles denominados Bits de Bloqueo de Arranque (**BLB**, *Boot Lock Bits*) es posible configurar un nivel de protección en cada sección. Con ellos se determina si la memoria flash queda protegida de una actualización, si sólo la sección de arranque queda protegida, si sólo la sección de aplicación queda protegida o ambas secciones quedan sin protección. Para el cargador AVR se mantiene la configuración de fábrica (sin restricciones), de manera que las aplicaciones pueden modificar toda la memoria de código, incluyendo el espacio ocupado por el cargador.

## Capacidades para Leer Mientras Escribe

Además de la división entre la sección de aplicación y la sección de arranque, la memoria flash también se divide en dos secciones de tamaño fijo, la primera es una sección con capacidad de Leer Mientras Escribe (**RWW**, *Read While Write*) y la segunda sección restringe el acceso, de manera que No se puede Leer Mientras Escribe (**NRWW**, *No Read While Write*). En la tabla 3 se muestra el tamaño de cada sección en un ATmega328, debe notarse que la sección NRWW abarca el espacio que originalmente tiene la sección de arranque.

Tabla 3 Límites de la sección RWW.

Sección	Páginas	Dirección
Leer mientras escribe (RWW)	224	0x0000 – 0x37FF
No leer mientras escribe (NRWW)	32	0x3800 – 0x3FFF

La diferencia fundamental entre la sección RWW y la NRWW es que:

- Cuando se está borrando o escribiendo una página localizada en la sección RWW, la sección NRWW puede ser leída durante esta operación.

- Cuando se está borrando o escribiendo una página ubicada en la sección NRWW, la CPU se detiene hasta que concluya la operación.

El cargador se ubica en la sección NRWW y las aplicaciones quedarán en la sección RWW, por lo que la CPU no se detendrá cuando el cargador lea o escriba una aplicación. Leer Mientras Escribe significa lecturas de la sección NRWW relacionadas con escrituras en RWW. En la figura 2 se muestran las secciones y el uso del apuntador Z para referenciar la ubicación de la página a modificar.

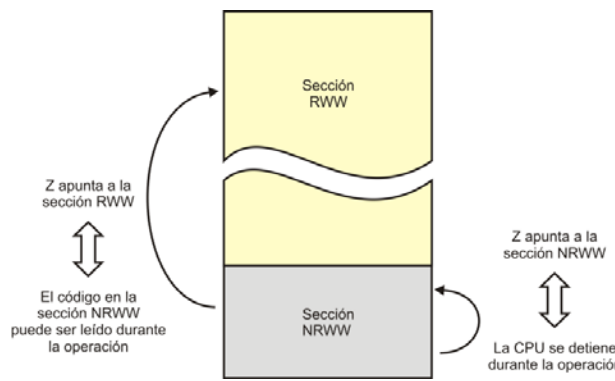


Figura 2 Acceso con el apuntador Z a las secciones RWW y NRWW.

### Escritura y borrado en la memoria flash

El repertorio de instrucciones de los AVR incluye a la instrucción **SPM**, con ella se escribe la palabra de 16 bits ubicada en los registros R1:R0 en la dirección de memoria flash referida con el registro Z. Sin embargo, su uso no es directo porque el acceso para la escritura o borrado se realiza por páginas completas.

El hardware incluye un buffer de memoria del tamaño de una página, en el que se hace un almacenamiento temporal antes de escribir en la memoria Flash. El espacio del buffer es independiente de la memoria SRAM, es sólo de escritura y debe ser llenado palabra por palabra. La escritura en el buffer se auxilia del registro **SPMCSR** (*Store Program Memory Control and Status Register*) porque su bit menos significativo es el habilitador de escritura (**SPMEN**, *Store Program Memory Enable*). El procedimiento para escribir una palabra en el buffer es:

- Colocar la palabra en R1:R0.
- Apuntar a la dirección de escritura con el registro Z.



- Poner el alto al bit **SPMEN** del registro **SPMCSR**.
- Dentro de los 4 ciclos de reloj siguientes, ejecutar la instrucción **SPM**.

El registro **SPMCSR** tiene otros 7 bits relacionados con el acceso a la memoria flash (tabla 4), de los cuales, sólo 3 son empleados por el cargador AVR, su uso se describe a continuación:

- Bit 4 – **RWWSRE**: Habilita la lectura de la sección RWW. El acceso a la sección RWW se bloquea después del borrado o escritura de una página. Para rehabilitar su acceso, el bit **RWWSRE** se debe poner en alto junto con el bit **SPMEN** y ejecutar la instrucción **SPM** dentro de los 4 ciclos de reloj siguientes.
- Bit 2 – **PGWRT**: Habilita la escritura de una página. Una vez que el buffer está lleno, con este bit en alto junto con el bit **SPMEN**, al ejecutar la instrucción **SPM** dentro de los 4 ciclos de reloj siguientes se inicia con la escritura de la página. En la parte alta del apuntador Z se debe colocar el número de página de la memoria flash y el valor de los registros R1:R0 es ignorado.
- Bit 1 – **PGERS**: Habilita el borrado de una página. Para el borrado de una página se deben poner en alto los bits **PGERS** y **SPMEN**, y durante los 4 ciclos de reloj siguientes se debe ejecutar la instrucción **SPM**. La página debe ser direccionada con la parte alta del apuntador Z y el valor de los registros R1:R0 es ignorado.

Tabla 4 Registro SPMCSR.

7	6	5	4	3	2	1	0
SPMIE	RWWSB	SIGRD	RWWSRE	BLBSET	PGWRT	PGERS	SPMEN

Las operaciones de escritura en el buffer, rehabilitación de acceso, escritura y borrado de página fallan si la instrucción **SPM** no se ejecuta dentro de los 4 ciclos de reloj siguientes a la puesta en alto de los bits correspondientes. El bit **SPMEN** se pone en bajo automáticamente al terminar cualquier operación.

## Direccionamiento de la memoria flash

El contador de programa (PC) es el registro encargado de direccionar la memoria de código, para el mapa completo de un ATmega328 se requieren de 14 bits ( $2^{14} = 16K$ ). Los bits del PC se dividen en 2 partes, con los 8 bits más significativos (PC[13:6]) se selecciona una página (PCPAGE, son 256 páginas) y con los 6 bits menos significativos (PC[5:0]) una palabra dentro de la página (PCWORD, cada página tiene 64 palabras). En las operaciones que usan la instrucción **SMP**, el apuntador Z debe hacer referencia a la memoria flash con la misma distribución de bits que el PC pero ignorando al bit menos significativo de Z. En la figura 3 se muestra la distribución de los bits para direccionar la memoria flash, para la escritura en el buffer se utilizan Z[6:1] y para la escritura y borrado de páginas se usan Z[14:7].

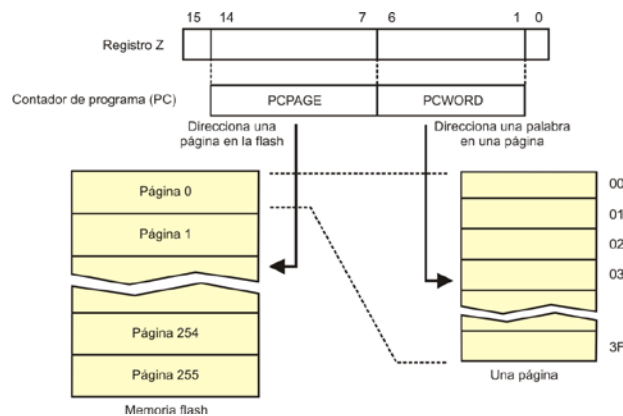


Figura 3 Distribución de bits para direccionar la memoria de código.

Las operaciones de escritura y borrado se realizan en varios ciclos de reloj, esto requiere la inserción de un *latch* intermedio en el que se captura la dirección proporcionada por el apuntador Z, de manera que Z puede ser utilizado para otras tareas después de haber iniciado la operación.

## Consideraciones para la codificación y descarga del cargador

El cargador AVR tiene el comportamiento mostrado en la figura 1, sin embargo, el temporizador 1 y la USART son manejados por interrupción, el vector de interrupciones se mueve al iniciar con la ejecución del cargador y regresa a su posición original al dar paso a la ejecución de la aplicación.

La codificación se realizó en lenguaje ensamblador porque se simplifica su ubicación en la memoria flash, básicamente se utiliza la directiva **org**. Además, se conoce con certeza qué registros han sido modificados, registros que deben regresar a su valor de *reset* cuando se de paso a la aplicación.

El cargador AVR es evaluado en una tarjeta Arduino UNO y ésta tiene un cristal externo, de manera que las terminales PB6 y PB7 (XTAL1 y XTAL2) no pueden ser usadas con un propósito general, de antemano no tienen presencia en los conectores disponibles para el usuario. El manual de Arduino especifica un cristal de 16 MHz, no obstante, hay implementaciones comerciales con cristales diferentes. En el cargador se prefirió utilizar el oscilador interno para que pueda funcionar sin importar la frecuencia del cristal incluido en la tarjeta.

El ATmega328 tiene un oscilador interno calibrado a una frecuencia de 8 MHz y por medio del fusible **CLKDIV8** se realiza una división entre 8, los dispositivos se comercializan con este fusible programado operando a 1 MHz. En el cargador se desprogramó para contar con una velocidad mayor de operación, de manera que 8 MHz es la frecuencia de la tarjeta y con ella se calcula la velocidad de comunicación serial que es de 9600 bps.

Los fusibles a modificar en el momento de realizar la descarga son: **CLKDIV8** para quitar el factor de división al oscilador interno y establecer como reloj del sistema al oscilador interno de 8 MHz y **BOOTRST** para definir que el MCU iniciará su ejecución en la sección de arranque y no en la de aplicación.

No se cambia el tamaño de la sección de arranque, se mantiene el tamaño original de 32 páginas porque corresponde con el tamaño de la sección **NRWW**, de esta manera una aplicación sólo ocupará el espacio **RWW** y no se detendrá la ejecución del MCU mientras se actualiza. Esto limita el tamaño de las aplicaciones a un espacio máximo de 14 K x 16 bits.

### **Comunicación entre la aplicación Java y el MCU**

La comunicación con el cargador se realiza mediante paquetes de datos que se envían al MCU desde una PC por medio del puerto serie. Cada paquete incluye un byte con el comando y la información necesaria para su ejecución. El MCU no es

activo por sí solo, sólo responde a los paquetes que la PC le envía bajo un protocolo protegido con una redundancia cíclica de 16 bits [7]. Se manejan 5 paquetes, inician con el byte 0xAA, seguidos por el byte de comando, argumentos si se requieren y terminan con el CRC.

Los paquetes de datos para la interacción PC-MCU son:

- Reconocimiento: Este paquete sirve para validar la conexión o para respuestas exitosas. La PC envía el comando 0xAA y si el MCU está conectado y ejecutando al cargador, responderá con la misma señalización. El paquete completo es:

0xAA 0xAA CRC-16 ( 2 bytes )

- Sin reconocimiento: El comando es una respuesta del MCU, utiliza al byte 0x11 y significa que el MCU no conoce el comando recibido o que ocurrió un error en el envío del paquete, reflejado en el cálculo del CRC. El paquete completo es:

0xAA 0x11 CRC-16 ( 2 bytes )

Si la PC recibe esta respuesta debe reenviar nuevamente al paquete para su correcta ejecución.

- Escritura: El comando es el byte 0x1A, con este comando la PC solicita la escritura de una página de código en la memoria flash del MCU, el paquete incluye la dirección de escritura y los 128 bytes de código (1 página tiene 64 palabras de 16 bits). El paquete tiene los campos:

0xAA 0x1A Dirección (2 bytes) Datos (128 bytes) CRC-16 ( 2bytes )

- El MCU responde con un paquete de reconocimiento (0xAA) si la escritura se hizo correctamente o sin reconocimiento (0x11) en caso contrario. Una aplicación puede contener varias páginas, de manera que el comando se puede ejecutar en repetidas ocasiones cuando se solicite la grabación de una nueva aplicación.

Lectura: El comando se distingue con el byte 0xA3, con este comando la PC solicita una página al MCU, para ello le envía la dirección de lectura, el paquete completo es:

0xAA 0xA3 Dirección (2 bytes) CRC-16 ( 2bytes )

Con este comando el MCU no responde con el paquete de reconocimiento, sino con la información solicitada. El MCU envía el paquete:

0xAA 0xA3 Datos (128 bytes) CRC-16 ( 2bytes )

- Borrado: El comando se identifica con el byte 0xB1 y desde la PC se solicita el borrado de la sección de aplicación (224 páginas, 28 Kbytes). El paquete es:

0xAA 0xB1 CRC-16 ( 2bytes )

### Aplicación en Java

El programa se implementa con ayuda del entorno de desarrollo Netbeans IDE 8.0, para obtener una interfaz amigable con el usuario. El proyecto lleva por nombre BL y cuenta con dos clases dedicadas a la comunicación serial, específicamente son dos hilos: Hilo\_Conector e Hilo\_Receptor que implementan a Runnable de modo que ambos subprocesos se pueden ejecutar simultáneamente [7]. La clase principal implementa un JFrame (ventana principal), en donde se insertan los botones, campos de texto y etiquetas necesarios para elegir el puerto serial a utilizar, ejecutar las acciones de Iniciar, Abrir archivo, Escribir, Leer, Borrar y visualizar el archivo HEX en una ventana secundaria.

Al ejecutar la aplicación se crean los objetos conector y receptor derivados de las clases Hilo\_Conector e Hilo\_Receptor respectivamente. Dentro de las clases se sobrescribe el método Run() que contiene el código que se ejecutará en un ciclo infinito. Ambas clases utilizan las funciones incluidas en la biblioteca Giovynet Driver. Las funciones de Giovynet Driver permiten el uso del lenguaje Java para crear aplicaciones que requieran implementar la comunicación serial con dispositivos externos, las funciones principales que se utilizan son: receiveSingleCharAsInteger() y sendSingleData() [8]. El primer hilo verifica que existan puertos seriales relacionados a la computadora y los inserta como nuevos elementos al comboBox de la interfaz principal. El segundo hilo realiza la lectura del bus de comunicaciones, con el fin de verificar que exista una conexión con el microcontrolador y obtener su respuesta a cada uno de los comandos recibidos.

El botón **Iniciar** configura todos los parámetros de la comunicación serial que luego serán parte del argumento del constructor de la clase Com. El botón **Abrir**

**Archivo** utiliza un filtro para visualizar únicamente archivos con extensión HEX, incluye una función que permite convertir los caracteres en ASCII a su valor entero para ser presentados en una ventana secundaria, los datos leídos se almacenan en un ArrayList. El botón **Escribir** almacena la trama con los comandos, las direcciones y el CRC-16 correspondiente a cada una de las páginas que conforman al archivo HEX.

Con ayuda de la clase `jOptionPane` se crean cuadros de diálogo que permiten al usuario identificar el estado de la comunicación serial, como en el caso de una escritura exitosa, un error en el borrado o un problema en la conexión. Utilizando únicamente una línea se pueden implementar estos cuadros de diálogo.

### 3. Resultados

En la figura 4 se observa el resultado final de la interfaz que permite la interacción del usuario y la tarjeta Arduino. Automáticamente la aplicación detecta los puertos disponibles en la computadora y permite al usuario elegir el correcto para después presionar el botón **Iniciar** y configurar la comunicación serial. Los botones de **Escribir**, **Leer** y **Borrar** se encuentran desactivados al inicio de la aplicación.



Figura 4 Ventana principal de la aplicación en Java.

El usuario tiene la posibilidad de verificar si la conexión entre la computadora y la tarjeta existe dando clic en *Herramientas/Comprobar conexión*, como se puede

observar en la figura 5. Por medio de un cuadro de diálogo se reconoce el estado de la conexión, ya sea conectado o desconectado. Los botones en la parte inferior de la interfaz corresponden a las acciones de: escribir archivo, leer y borrar, que se habilitan al comprobar la conexión.



Figura 5 Comprobación de la conexión computadora-tarjeta.

Con un programa sencillo se realizaron las pruebas de Escribir y Borrar. En la figura 6 se observa el microcontrolador funcionando después de realizar la escritura de un programa que enciende y apaga un par de leds, en la pantalla de la computadora aparece un cuadro de diálogo indicando que la escritura se realizó con éxito.

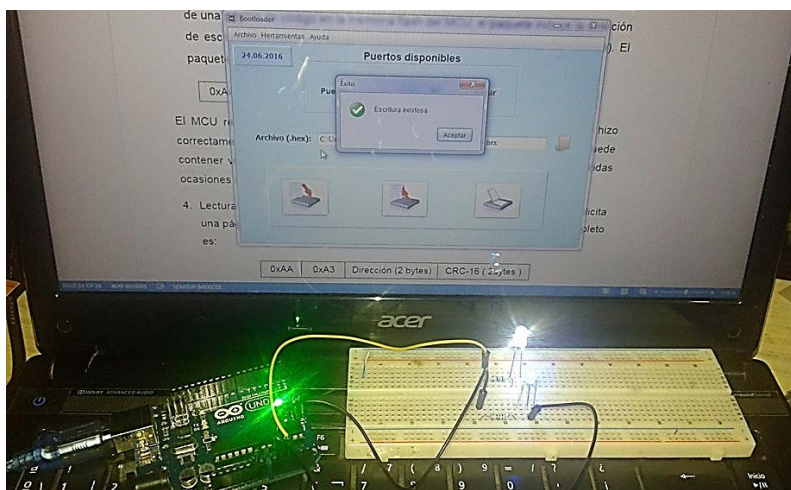


Figura 6 Aplicación en Java y el microcontrolador ATmega328 en operación.

## 4. Discusión

Entre los desarrolladores de aplicaciones con microcontroladores ha habido una extensa discusión relacionada con el lenguaje de programación empleado, están quienes defienden de manera tajante el uso de ensamblador argumentando un mejor aprovechamiento de recursos y por otro lado, están quienes prefieren los lenguajes de alto nivel porque es más fácil estructurar los programas y por lo tanto, se reduce el tiempo de desarrollo.

Algo similar ocurre entre el uso de Arduino y un microcontrolador independiente, con Arduino se reduce el tiempo de desarrollo y se pueden hacer aplicaciones rápidas aun desconociendo la organización del microcontrolador, la contraparte es que los recursos internos del MCU no se aprovechan al máximo y se imposibilitan algunas tareas que requieren respuestas inmediatas. De manera que, de acuerdo con la experiencia del desarrollador, pueden surgir diversos argumentos de por qué una propuesta es mejor que otra.

Con el desarrollo del cargador AVR se intentan aprovechar las ventajas de ambas propuestas, dado que permite el uso directo del microcontrolador AVR disponible en una tarjeta Arduino.

## 5. Conclusiones

La metodología tradicional del desarrollo de sistemas basados en microcontroladores se ve muy favorecida con la inclusión del cargador AVR en el MCU porque se simplifica significativamente el proceso de desarrollo al realizar la descarga de nuevas aplicaciones como si se tratase de un conjunto de datos.

El hecho de emplear una tarjeta Arduino como destino del cargador también proporciona grandes ventajas, dado que el desarrollador no invierte tiempo en el desarrollo de hardware y puede disponer de los diferentes *shields* existentes en el mercado.

El cargador AVR y la aplicación en Java complementaria constituyen una herramienta que puede ser bien aprovechada por los estudiantes de ingenierías en electrónica y mecatrónica. La experiencia ha demostrado que cuando toman el curso de microcontroladores ya han desarrollado aplicaciones con la tarjeta



Arduino pero desconocen la organización y funcionalidad de los dispositivos empleados. Así que, el diseño de nuevos proyectos se simplificará significativamente al reutilizar el hardware que ya han adquirido y al descargar nuevas aplicaciones en un estilo similar al que ya conocen.

## 6. Referencias

- [1] F. Santiago Espinosa. Los Microcontroladores AVR de Atmel. 2012. Editado e Impreso por la Universidad Tecnológica de la Mixteca. ISBN: 978-607-95222-7-8.
- [2] M. A. Mazidi, S. Naimi. The AVR Microcontroller and Embedded Systems using Assembly and C. 2011. Prentice Hall. ISBN 13: 978-013-800331-9.
- [3] Arduino – Introduction. <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. Junio de 2016.
- [4] F. Reyes Cortés, J. Cid, Monjaraz. 1ª Edición. MARCOMBO, S.A. ISBN: 9788426722041
- [5] ATMEL ATmega328/P, 8-Bit Microcontroller with 32Kbyte In-System programmable flash, Atmel-8271J-AVR- ATmega-Datasheet\_11/2015.
- [6] How To Write a Simple Bootloader For AVR In C language. <http://atmega32-avr.com/how-to-write-a-simple-bootloader-for-avr-in-c-language/>. Agosto de 2016.
- [7] A. S. Tanenbaum, “Redes de Computadores”, 4a. ed. 2003. Ed. Prentice Hall.
- [8] Paul Deitel, Harvey Deitel, Como programar en Java. 7a. ed. 2008. Ed. Pearson Educación.
- [9] Giovynet Driver. [www.giovynet.com/giovynetDriver\\_en.html](http://www.giovynet.com/giovynetDriver_en.html). Junio de 2016.

## 7. Autores

M.C. Felipe Santiago Espinosa es Licenciado en Electrónica egresado de la BUAP, Maestro en Ciencias con especialidad en Electrónica por parte del INAOE y candidato a Doctor en Robótica por la UTM. Es Profesor-Investigador en la Universidad Tecnológica de la Mixteca desde 1998, perteneciendo al Instituto de

Electrónica y Mecatrónica. En el año de 2012 publicó su libro titulado “Los Microcontroladores AVR de ATMEL”.

Zenón Belarmino Martínez Cruz es estudiante de Ingeniería en Electrónica en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, en donde está cursando el 9º semestre. En verano de 2016 realizó una estancia profesional en Soluciones Metasoftica, desempeñándose como desarrollador web.

# **SISTEMA DE REGISTRO DE DATOS VÍA RFID Y CÓDIGO DE BARRAS**

***Miguel Magos Rivera***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*mrm@correo.azc.uam.mx*

***Ricardo Godínez Bravo***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*rgb@correo.azc.uam.mx*

***Ivonne Karina Rodríguez Islas***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*vonne.1271@gmail.com*

## **Resumen**

En el presente artículo se muestran las etapas de construcción, implementación y pruebas de un *Sistema de Registro de Datos Vía RFID y Código de Barras*. El dispositivo, basado en un microcontrolador, permite registrar y almacenar en tiempo real la información almacenada en una etiqueta de código de barras, así como en tarjetas con tecnología RFID. Datos como: hora y fecha de detección también pueden ser registrados. Como característica adicional, el sistema puede enviar en forma serial la información recabada a una aplicación desarrollada en Visual Basic la cual genera un registro de los datos en formato Microsoft Excel. El objetivo al elaborar el sistema, fue de adquirir experiencia y evaluar la posibilidad de emplear estos elementos en aplicaciones de automatización de procesos a nivel industrial. Los resultados obtenidos dejan ver que la tecnología RFID tiene la ventaja de poder detectar objetos aun sin estar dentro de un ángulo de visión, como es el caso del lector de código de barras. Sin embargo el alcance de detección del lector empleado es relativamente corto: 12 cm.

**Palabra(s) Clave(s):** Código de barras, identificación por radiofrecuencia, sistemas embebidos, Visual Basic.

## 1. Introducción

La identificación de productos y materiales a nivel industrial y comercial es una necesidad en constante crecimiento. Aprovechando propiedades de los materiales de elaboración o bien características físicas del objeto a identificar, se han empleado a lo largo de los años sensores inductivos, fotoeléctricos y capacitivos, por mencionar sólo algunos [1]. Más recientemente se ha empezado a generalizar el empleo de sistemas de reconocimiento visual para tareas de identificación y clasificación de objetos [2]. Dos de las tecnologías con mayor impacto tanto a nivel comercial como industrial son las basadas en Códigos de Barras y la Identificación por Radio Frecuencia (RFID por sus siglas en inglés). Estos métodos de identificación, además de su bajo costo, tienen la ventaja de no depender de materiales de fabricación ni de características físicas particulares de los objetos [3].

Los primeros sistemas de identificación basados en código de barras fueron empleados a nivel comercial en la década de los 70s del siglo pasado [4]. De forma similar a las líneas y puntos del código Morse, el de barras permite representar pequeñas cantidades de información por medio de un conjunto lineal de barras y espacios. Su codificación ha sido definida de forma estándar por la Organización de Estándares Internacionales [5]. En los últimos años se han desarrollado sistemas de identificación por códigos de barras de dos dimensiones en los cuales la cantidad de información que se puede manejar es considerablemente mayor que con su equivalente de una dimensión. Mientras que un código de barras comercial de una dimensión puede estar formado por poco más de 10 caracteres, en uno de dos dimensiones se pueden introducir cadenas de información de hasta 2000 [6]. La figura 1 muestra ejemplos de códigos de barras de una y dos dimensiones.



Figura 1 Ejemplos de códigos de barras de una y dos dimensiones.

El uso generalizado de los sistemas de identificación basados en códigos de barras se debe, principalmente, a su bajo costo. El estampado de un código de barras requiere de una impresora de etiquetas la cual se debe adherir al objeto o bien de un equipo de impresión en línea. También es común la impresión del código directamente en el empaque del producto. Los lectores tienen un costo muy bajo, unos cuantos dólares, y pueden ser conectados directamente a computadoras, máquinas registradoras y diversos sistemas de control. La principal desventaja de esta tecnología es que requiere una línea de vista entre el código impreso y el lector. Lo anterior dificulta su empleo en sistemas en los cuales no se puede garantizar la posición del objeto a identificar respecto del lector, o bien, en situaciones donde existen obstáculos entre ambos [7].

Las primeras aplicaciones de los sistemas de identificación basados en radio frecuencia datan de la segunda guerra mundial [8]. Un sistema de identificación por radiofrecuencia reconoce objetos mediante la transmisión de señales de radio hacia un equipo lector, desde un conjunto antena-microchip (tag) colocado sobre el elemento a distinguir. El tag tiene grabado un código de identificación único que es enviado al lector, el cual, a partir de una consulta en una base de datos, se encarga de reconocer el objeto [9, 10]. La capacidad de almacenamiento de información de estos dispositivos es considerable, en su formato más simple se pueden programar hasta  $8 \times 10^{28}$  códigos distintos.

El código de identificación contenido en los tags más comunes empleados en la actualidad, es grabado por el fabricante del mismo y no puede ser modificado por el usuario. Estos dispositivos no cuentan con fuente de energía, la alimentación necesaria para su operación es producida a partir de un campo electromagnético generado desde el equipo lector, figura 2. A estos elementos se les conoce como: tags pasivos de sólo lectura. Existen en el mercado tags que tienen integrada una fuente de energía además de tener la posibilidad de modificar el identificador grabado en su memoria. A estos se les denomina tags activos y presentan como característica principal el tener un mayor alcance que el que se maneja en uno pasivo, sin embargo tanto su tamaño como su costo es considerablemente superior [9, 10].

Debido a la miniaturización y a la reducción de los costos de fabricación de los elementos que lo conforman, entre otros factores, en las últimas dos décadas el empleo de los sistemas RFID ha presentado un desarrollo importante [11, 12].

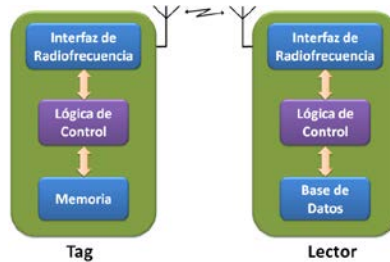


Figura 2 Principio de operación de un tag pasivo.

Al igual que los lectores de códigos de barras, los sistemas RFID permiten la identificación de objetos a distancia y sin contacto. Sin embargo, al emplear señales de radio para la transmisión de la información, estos últimos no requieren de una línea de vista como es el caso entre el lector y la etiqueta impresa con un código de barras. La tecnología de código de barras, debido al bajo número de caracteres que puede manejar, sólo permite la identificación de grupos de productos, por ejemplo, cajas de cereales de un peso y marca específicos, pero sin poder diferenciar entre elementos del mismo grupo. Por su lado, los sistemas de RFID con su elevada capacidad de almacenamiento, abren la posibilidad de diferenciar un elemento de otro dentro de un mismo grupo, lo cual le da un enorme valor agregado a esta tecnología. No obstante que los sistemas basados en radiofrecuencia han presentado una reducción considerable en su costo, la técnica de identificación mediante códigos de barras sigue siendo la mejor opción en un gran número de aplicaciones dado su costo prácticamente nulo.

La aplicación de la identificación de objetos en tareas de automatización de procesos industriales ha crecido en los últimos años gracias a que cada vez son más los fabricantes de equipos de control que ofrecen productos basados en RFID y/o códigos de barras con características apropiadas a esta área [13, 14].

La interconexión de dos de los sistemas más empleados para la identificación de objetos, con equipos de control y monitoreo de procesos, tales como: Controladores Lógicos Programables, Controles de Propósito Específico,

Interfaces Hombre-Máquina y Control por Computadora, abre la posibilidad de llevar la automatización de procesos industriales a niveles de versatilidad que anteriormente no podían ser considerados.

En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un sistema que permite la lectura de la información contenida en una etiqueta impresa con un código de barras, así como la que se encuentra almacenada en un Tag para RFID. El equipo, cuya construcción se basó en un microcontrolador, cuenta con una interface constituida por una pantalla LCD de 2 renglones con 16 caracteres cada uno y de un teclado de 16 botones. Con estos elementos el usuario puede seleccionar la tecnología a utilizar, así como observar la información contenida en el dispositivo correspondiente, junto con la hora y fecha de la lectura. El código extraído de cada elemento, se almacena en la memoria del sistema para ser posteriormente transmitido vía USB a una computadora en donde se registrará en un archivo de Excel. Se elaboró una aplicación en Visual Basic que se encarga, tanto de establecer la comunicación con el microcontrolador para la descarga de la información, como la escritura de la misma en la hoja de datos.

El objetivo principal al desarrollar este prototipo, es el de conocer los protocolos y métodos disponibles para la lectura de la información contenida en estos dos medios de identificación, con el fin posterior de diseñar sistemas que permitan la transferencia de los datos a equipos comerciales empleados en el monitoreo y control de procesos industriales.

## **2. Desarrollo**

En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques del *Sistema de Registro de Datos Vía RFID y Código de Barras*, en él se muestran los principales módulos del sistema, mismos que se explican en las siguientes secciones de este documento.

### **Lectores de identificadores**

#### **Lector de Códigos de Barras**

El lector de códigos de barras empleado en esta aplicación es un dispositivo tipo pistola marca UNITECH. El protocolo de intercambio de información de un

lector de código de barras es similar al de un teclado de computadora tradicional. Este consiste en una señal de reloj para sincronizar la transmisión de la información, una serie de datos que contiene los códigos asociados para cada caracter del código de barras o tecla del teclado, un bit de inicio, otro de fin y uno más señalado la paridad de la cadena transmitida, figura 4.



Figura 3 Diagrama a bloques del sistema.

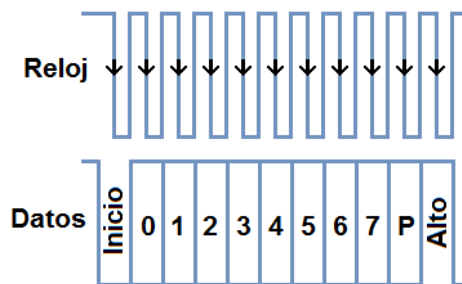


Figura 4 Protocolo enviado por un teclado para PC.

En la figura 5, se muestran las señales correspondientes a la transmisión del caracter alfanumérico “T” cuyo código es: “2C” (0010 1100). Se observa la señal de reloj, la cual contiene los 11 pulsos necesarios para transmitir el código hexadecimal de 8 bits, más tres de control.



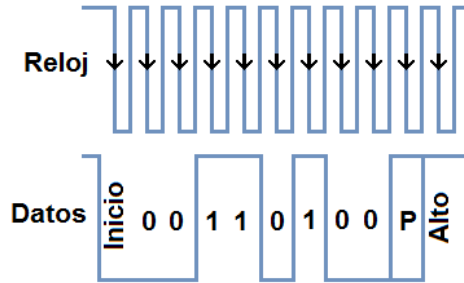


Figura 5 Señales enviadas por un teclado para PC correspondientes a la tecla “T”.

Los códigos transmitidos no corresponden a los valores ASCII de los caracteres, sino a números hexadecimales específicos, los cuales se muestran en la figura 6.

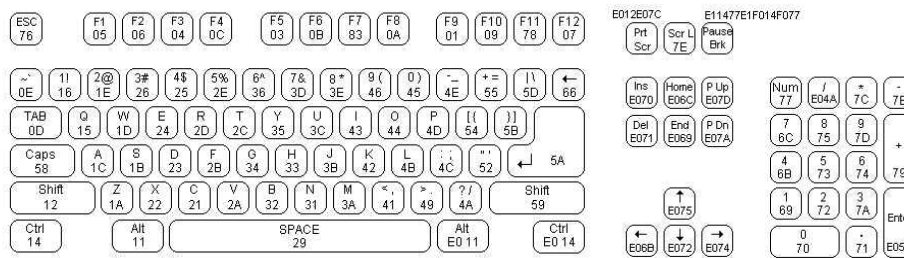


Figura 6 Códigos asociados a las teclas de un teclado para PC.

Un lector de código de barras realiza el proceso anterior para  $n$  caracteres, posteriormente es insertado automáticamente el carácter no imprimible “ENTER” (5AH) siendo este el momento en el cual se despliega la palabra total equivalente al código de barras. Esto último marca la diferencia entre un teclado y un lector de código de barras.

En el caso del código 00H3FA00, figura 7, la trama de datos enviados por el lector se muestra en la figura 8, los datos son los siguientes: 45, 45, 12, 33, 26, 12, 2B, 12, 1C, 45, 45, 5A, todos en formato hexadecimal.

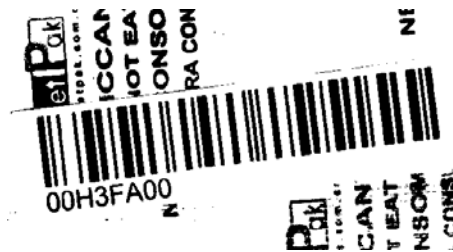


Figura 7 Ejemplo de un código de barras.

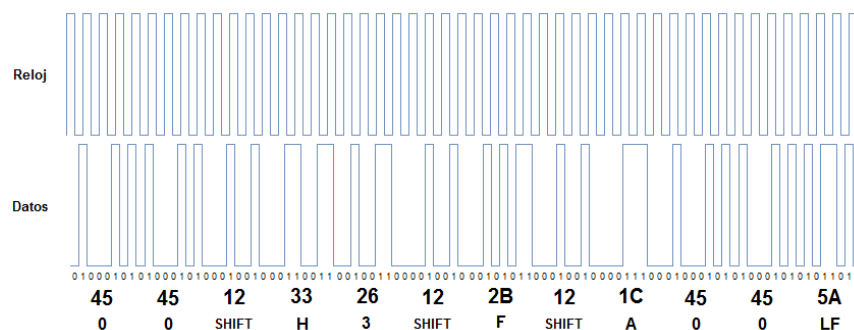


Figura 8 Trama enviada por un lector de código de barras para 00H3FA00.

Como se observa en la cadena anterior, aparece el dato 12H, el cual corresponde a la tecla Shift para indicar que el siguiente carácter será una letra mayúscula, se observa también el carácter 5AH señalando el fin de código.

### Lector RFID

En el caso del subsistema RFID, se utilizó el lector ID-12 de la marca ID Innovations EM. Este dispositivo está configurado para: generar el campo electromagnético que activará al tag, leer la información contenida en la tarjeta y transmitir en forma serial el código detectado. El tipo de tarjeta que puede leer este elemento es el EM4100, la cual es de solo lectura y opera a una frecuencia entre 100 kHz y 150 kHz (valor típico de 125 kHz). Cuando el módulo ID-12 detecta una tarjeta RFID, transmite una cadena de datos siguiendo el formato que se muestra en tabla 1. Cada carácter de la cadena es enviado de forma serial en formato ASCII, a 9600 Bauds, un bit de inicio (0 volts), 8 bits de datos, sin bit de paridad y 1 bit de parada (5 volts) [15], [16].

Tabla 1 Protocolo enviado por el lector ID-12.

02 (1byte)	10 ASCII Hex Data Characters (10bytes)	2 ASCII char's Checksum (2byte)	CR (1byte)	LF (1byte)	03 (1byte)
---------------	---	------------------------------------	---------------	---------------	---------------

Como puede observarse, la transmisión principia con el envío de un byte conteniendo el número 02 en formato hexadecimal, este valor señala al receptor que un dato está iniciando. Posteriormente se transmite el identificador de la tarjeta, se trata de una cadena de 10 caracteres ASCII. El valor de verificación de

la cadena (checksum), es transmitido como dos caracteres también en formato ASCII. Posteriormente se transmiten los códigos de retorno de carro (CR) y salto de línea (LF). La transmisión finaliza con el envío de un byte conteniendo el número 03 en formato hexadecimal. De esta forma se tiene que la longitud total de la cadena transmitida es de 16 bytes, de estos sólo los datos de la tarjeta y el valor de verificación de la cadena se envían en formato ASCII (hexadecimal). En la figura 9 se observa la trama que el lector envía al detectar un tag con código de identificación: A09071403637.

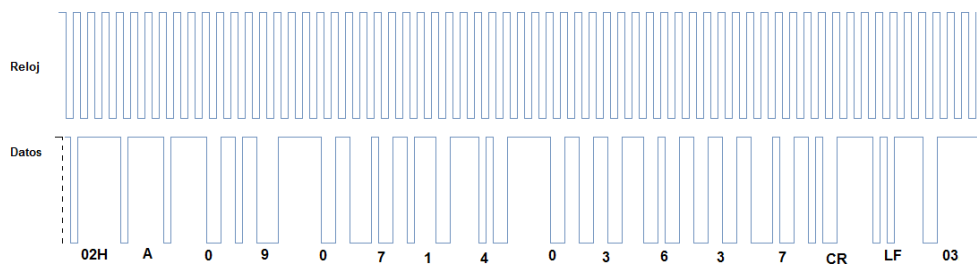


Figura 9 Trama enviada correspondiente a un Tag RFID con código: A09071403637.

La figura 10 muestra los caracteres recibidos en la computadora mediante la aplicación “HyperTerminal” de Windows para la tarjeta del ejemplo anterior. Se observan los caracteres ASCII de los códigos del tag, además de los símbolos asociados a los datos 02H, CR y LF. Los símbolos: ☺ y ♥ corresponden a: 02H y 03H respectivamente.

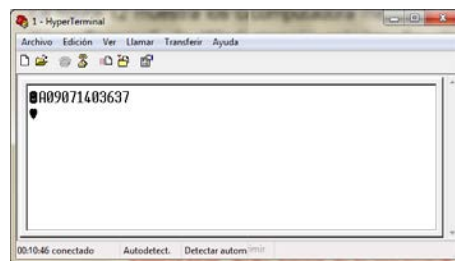


Figura 10 HyperTerminal del contenido de un Tag RFID con código: A09071403637.

## Interfaz local

El Sistema de Registro de Datos Vía RFID y Código de Barras cuenta con una interfaz la cual está conformada por un teclado matricial y un display de cristal

líquido (LCD), por medio de este, y de una serie de menús, el usuario configura la operación del sistema.

### Teclado Matricial

El teclado matricial fue implementado con 16 teclas tipo interruptor modelo MICROSWITCH PUSH MINI 4 PINES, en un arreglo de 4 renglones y 4 columnas. Este bloque se encuentra conectado al puerto 2 del microcontrolador del Sistema Digital (Puerto 2) en el cual se programaron rutinas de detección de teclas mediante el envío de una señal de prueba a través de las columnas y detectar esta en los renglones.

### Pantalla LCD

La pantalla tipo LCD modelo JHD-162ASTNLED, permite visualizar información del sistema. Este elemento se encuentra conectado al microcontrolador a través del puerto 0. De igual manera que para el teclado, se desarrollaron rutinas en el Sistema Digital que se encargan de enviar la información adecuada al display dependiendo de las opciones seleccionadas. Algunos de los parámetros que se pueden configurar con la interfaz son: tipo de dispositivo a usar (Lector de CB o de RFID), hora y fecha de inicio de registro de los códigos, iniciar el almacenamiento de registros y descargar datos a la computadora, entre otros. La figura 11 muestra el flujo de las pantallas en la interfaz local.

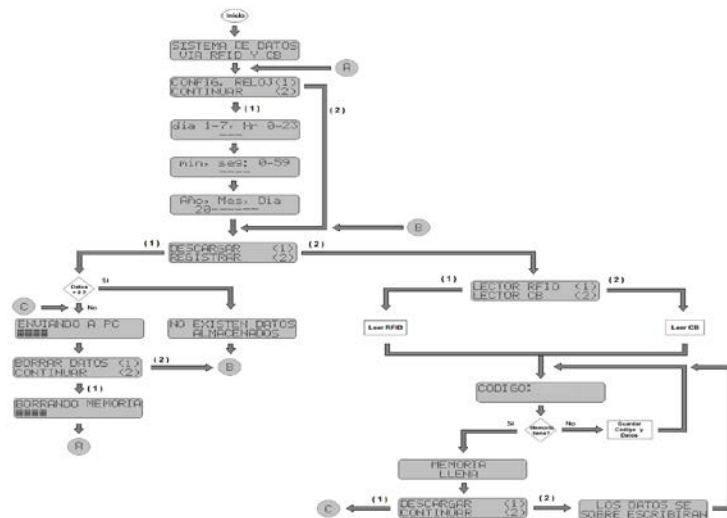


Figura 11 Diagrama de flujo de las pantallas mostradas en la interfaz local.

## Interfaz de registro de datos

La interfaz para la computadora que permite al usuario cargar los datos almacenados en el equipo, fue desarrollada en Visual Basic. Consiste de una pantalla principal con un botón para iniciar la transferencia de los datos, un indicador que muestra el número de datos recibidos y una barra de progreso que indica el avance de la transferencia. Los datos que son leídos por el programa de cómputo son: los códigos RFID o CB detectados, la hora y la fecha de registro.

La figura 12 muestra algunas de las ventanas que conforman la interfaz de registro de datos desarrollada. Por su parte, en la figura 13 se muestra el diagrama de flujo del programa desarrollado en Visual Basic correspondiente a la interfaz. Por último, en la figura 14, se muestra un ejemplo del tipo de hoja de datos de Microsoft Excel que se genera con la aplicación.



Figura 12 Vista de algunas pantallas de la interfaz de registro de datos.

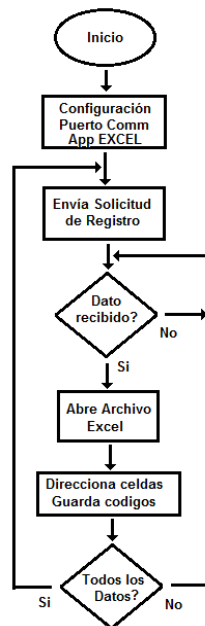


Figura 13 Diagrama de flujo programa correspondiente a la Interfaz de Registro de Datos.

Registro de Datos Vía RFID - CB								
CÓDIGO	Tiempo			Fecha				
RFID - CB	Hora	Minutos	Segundos	Día Semana	Día	Mes	Año	
A09071401D1C	15	46	32	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403637	15	46	35	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403130	15	46	38	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403130	15	46	42	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403637	15	46	45	Martes	12	Agosto	2014	
A09071401D1C	15	46	48	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403130	15	46	50	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403637	15	46	53	Martes	12	Agosto	2014	
A09071401D1C	15	46	56	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403637	15	47	0	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403130	15	47	2	Martes	12	Agosto	2014	
A09071403637	15	47	5	Martes	12	Agosto	2014	
A09071401D1C	15	47	7	Martes	12	Agosto	2014	
A09071401D1C	15	47	10	Martes	12	Agosto	2014	
A09071401D1C	15	47	13	Martes	12	Agosto	2014	

Figura 14 Hoja de datos en Microsoft Excel generada.

### Sistema digital

Este bloque es el corazón del sistema, basado en un microcontrolador registra en memoria el código del tag o CB detectado, así como la hora y la fecha del evento. La figura 15 muestra el diagrama a bloques del circuito electrónico diseñado.

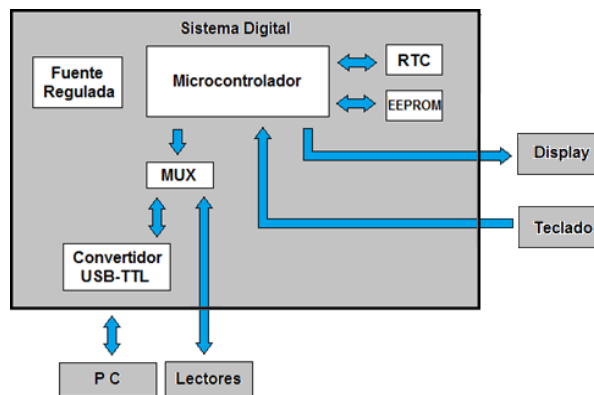


Figura 15 Diagrama de bloques del sistema digital.

### Reloj de tiempo real

Con el fin de contar en todo momento con datos de la hora y fecha, se incluyó en el diseño un reloj de tiempo real. Se trata del circuito integrado DS1307, el cual es un dispositivo reloj/calendario que proporciona segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año.

## **Memoria EEPROM**

Para el almacenamiento local de la información, se empleó una memoria EEPROM 24C128. En esta se resguardan los códigos, así como la hora y fecha del momento en que es detectado un tag o CB por el sistema digital. La transferencia de información hacia o desde la memoria EEPROM se realiza mediante el protocolo de comunicación serial I2C.

## **Convertidor USB-TTL**

También se incluyó el circuito FT232RL, se trata de un convertidor USB-TTL diseñado para permitir de forma rápida y sencilla la conexión entre dispositivos con una interfaz serial.

## **MUX**

Para poder direccionar el puerto de comunicación entre la PC y los lectores se utilizó un multiplexor HCF4052. Las terminales de salida del circuito son conectadas directamente al microcontrolador en los pines correspondientes al puerto serial (TxD y RxD). La terminal P1.7 del microcontrolador es usada como señal de selección entre la PC y los lectores y así tener canales independientes de comunicación serial. De esta forma a través de las terminales del multiplexor, se puede comunicar al microcontrolador con los lectores y con la interfaz de registro de datos en la PC, vía USB, lo anterior seleccionando el canal mediante las señales de control del microcontrolador.

## **Microcontrolador AT89S52**

La base del sistema digital es el microcontrolador AT89S52 de ATMEL con Tecnología INTEL. Este dispositivo está basado en los microprocesadores de 8 bits, contiene internamente una CPU de 8 bits, 4 puertos de entrada y salida paralelo los cuales pueden ser direccionados por bit; posee señales de control para comunicación serial (UART), 3 entradas para Timer/Contador de 16 bits, terminales para detectar interrupciones externas y puede trabajar como

procesador con una capacidad de direccionamiento de hasta 64K de memoria externa tanto de datos como de programa.

Este microcontrolador puede generar la frecuencia de transmisión/recepción de datos por el puerto serie de manera automática, partiendo de la frecuencia de oscilación general del sistema. La frecuencia de transmisión puede ser modificada en cualquier momento con sólo cambiar el valor almacenado en el registro de control de la UART, o también se puede duplicar o dividir la frecuencia escribiendo directamente sobre el bit 7 (SMOD) del registro de control PCON.

El puerto serie del microcontrolador es un puerto tipo: *Full Duplex*, lo cual significa que puede transmitir y recibir datos simultáneamente. Es mediante este puerto que el Sistema Digital se comunica con los lectores y con la Interfaz de Registro de Datos en la PC. Lo anterior, como ya se mencionó, multiplexando las líneas de comunicación de la UART.

El programa desarrollado para el microcontrolador permite que se realicen las acciones necesarias para la lectura y almacenamiento local de los códigos junto con la hora y fecha, manejo del display y teclado de la interfaz local e intercambio de información con la computadora. El diagrama de flujo correspondiente que se muestra en la figura 16.

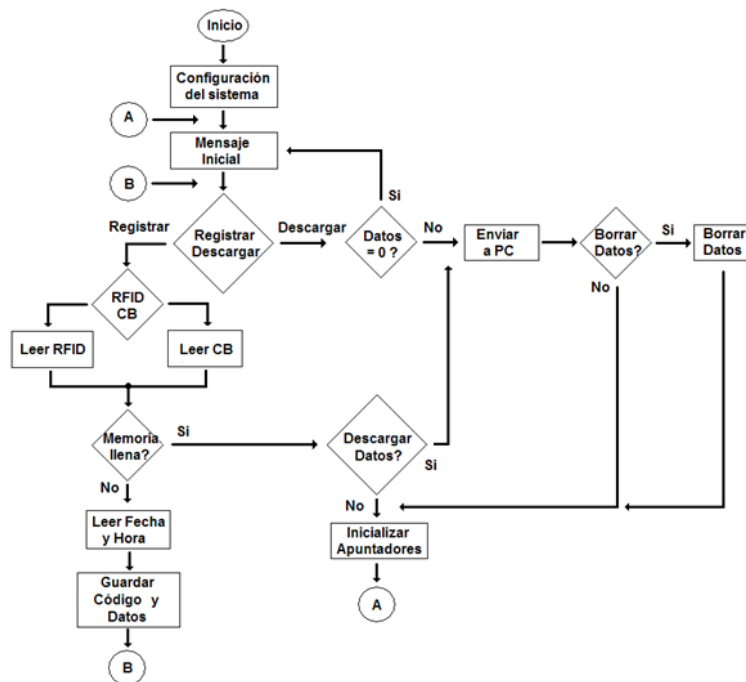


Figura 16 Diagrama de flujo del programa del microcontrolador.



### 3. Resultados

Para ambos lectores se observó que los códigos de identificación eran relativamente fácil de detectar. Al ser transmitidos bajo un protocolo de comunicación serial, la recepción y procesamiento de la información con un microcontrolador es factible. En el caso del lector de códigos por RFID, se confirmó el alcance de 12 cm, además de la inmunidad de la señal ante algunos obstáculos como son: papel, madera, plástico, polvo, etc. Pero también se observó la imposibilidad de las señales para traspasar barreras metálicas, aun siendo muy delgadas.

Las imágenes que se presentan en las figuras 17 y 18, muestran algunas vistas del sistema construido. En la primera imagen se observan los conectores para la comunicación USB con la PC en un extremo del gabinete, mientras que en el extremo opuesto está la conexión del *Sistema Registro de Datos Vía RFID y Código de Barras* con los lectores.

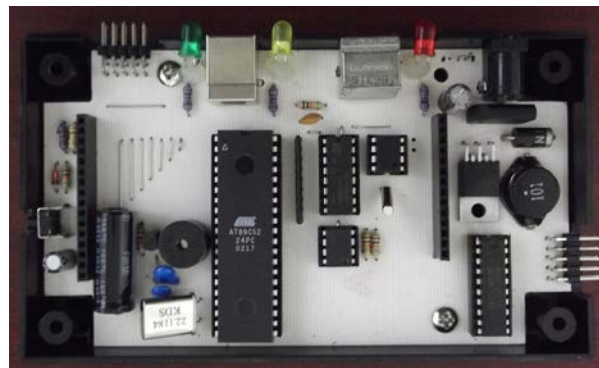


Figura 18 Distribución de componentes en el prototipo.



Figura 19 Sistema de Adquisición y Registro de Datos Vía RFID y Código de Barras.

En la figura 20, se muestran dos de los mensajes que se despliegan en el display de la interfaz local. Se trata de los menús para seleccionar la acción a realizar y el tipo de detector a emplear.



Figura 20 Pantallas del menú de configuración en la interfaz local.

#### **4. Conclusiones**

El objetivo principal en el desarrollo del proyecto que se presentó en este artículo fue el conocer y evaluar los protocolos de las dos principales tecnologías empleadas para la identificación de productos y materiales a nivel comercial. Lo anterior con la idea de emplearlos en aplicaciones de control e instrumentación industrial. Se observó que la comunicación con estos dispositivos hace factible su uso en aplicaciones de automatización de procesos industriales. Se comprobó también que, empleando sistemas basados en microcontroladores como interfaces, la información de estos lectores puede ser enviada a aplicaciones desarrolladas en Visual Basic. Esto abre la posibilidad de utilizarlos en sistemas de Control por Computadora, así como en Interfaces-Hombre-Máquina (HMI). Al momento de redactar este artículo, se trabaja en el diseño de un sistema de identificación de sacos de granos en una empresa procesadora de alimentos. Así mismo, se tienen un excelente avance en la implementación de este tipo de lectores en sistemas didácticos basados en bandas transportadoras para la clasificación de objetos.

#### **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Fundamentos del sensado o detección de presencia. Manual de Capacitación. Rockwell Automation. USA. Enero 2000.
- [2] H. Golnabi, A. Asadpour, "Design and application of industrial machine vision systems". Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Vol. 26. No. 6. December 2007. Pp. 630-637.

- [3] Auto ID in the material handling industry. Accu-Sort Systems. USA. January 2007.
- [4] All about 2D Bar Codes. Socket Communications Inc. USA 2007.
- [5] International Organization for Standardization. <http://www.iso.org/iso/home.html>. Agosto de 2014.
- [6] Bar coding 101. What you need to know. Application White Paper. ZIH Corporation. USA. 2005.
- [7] Bar Code Basics. Technology White Paper. Microscan Systems Inc. USA. 2011.
- [8] W. Buesser, V. Fuentes, P. Goguillot, N. Nandra, T. Roz, J. Rudin, "A contact less read write transponder using low power EEPROM techniques".
- [9] Proceedings of the 22nd European Solid-State Circuits Conference. Neuchâtel, Switzerland. September 1996.
- [10] D. Kou, K. Zhao, Y. Tao y W. Kou, "RFID Technology and applications". Enabling Technologies for Wireless E-Business. Pp. 486-489. 2006.
- [11] R. Want, "An introduction to RFID technology". Pervasive computing. Vol.5. No. 1. Jan-March 2006. Pp. 25-33.
- [12] D. Wang, "Review on modeling and optimization problems about RFID technology and applications". Control and Decision Conference. Guiyang, China. May 2013. Pp. 1258-1263.
- [13] X. Zhu, S. K. Mukhopadhyay, H. Kurata, "A review of RFID technology and its managerial applications in different industries". Journal of Engineering and Technology Management. Vol. 29. No. 1. January-March 2012. Pp. 152-167.
- [14] Modular RFID System. Turck Inc. USA 2007.
- [15] RFID Systems. Simatic RF. Siemens AG. USA. September 2009.
- [16] M. Magos, R. Godínez, A. Carmona, A. Hernández, "Construcción de un Sistema RFID para Aplicaciones en Control de Procesos". Memorias VII Semana Nacional de Ingeniería Electrónica. Tapachula, México. 2011. Pp. 327-335.

- [17] M. Magos, R. Godínez, A. Carmona, A. Hernández, "Evaluación de un Sistema de Identificación RFID para Aplicaciones en Automatización". Memorias Reunión de Otoño IEEE ROC&C Acapulco, México. 2011.

## **6. Autores**

Dr. Miguel Magos Rivera es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana, Maestro y Doctor en Control Automático por la Universidad Claude Bernard de Lyon (Francia). Actualmente es profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Ing. Ricardo Godínez Bravo es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Autónoma Metropolitana. Actualmente cuenta con el 100% de créditos de la Maestría en Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Ecatepec además de ser profesor-investigador en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

Ivonne Karina Rodríguez Islas es estudiante de 11<sup>o</sup> trimestre de la Licenciatura en Ingeniería Electrónica en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco.

# IDENTIFICACIÓN DIGITAL E INFRAESTRUCTURA PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD EN EL CIBERESPACIO

***Francisco R. Cortes Martínez***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria  
*al114359@alumnos.uacj.mx*

***Ángel D. Herrera Candelaria***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria  
*al114847@alumnos.uacj.mx*

***Rafael Martínez Peláez***

Universidad de la Salle Bajío, Facultad de Ingeniería en Computación y Electrónica  
*rmartinezp@delasalle.edu.mx*

***Yesica I. Saavedra Benítez***

Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*ysaavedrab@toluca.tecnm.mx*

***Pablo Velarde Alvarado***

Universidad Autónoma de Nayarit, Área de Ciencias Básicas e Ingenierías  
*pvelarde@uan.edu.mx*

## **Resumen**

El número de usuarios de Internet crece día a día y el mecanismo utilizado para registrar nuevos usuarios continúa siendo el formulario de registro web. Las funciones del formulario de registro web son verificar el formato utilizado en cada campo y revisar que todos los campos se encuentren completados. Puesto que, el formulario de registro web no tiene la función de verificar la información capturada por el usuario, se puede utilizar información falsa o robada para crear cuentas de usuario. En consecuencia, usuarios maliciosos pueden crear cuentas falsas y realizar actividades ilegales, tales como acoso sexual, *bullying*, suplantación de identidad, trata de personas, entre otras. Por consiguiente, se propone una

identificación digital que contenga información del ciudadano y se pueda verificar su legitimidad. También, se presenta una propuesta de infraestructura que puede sustentar los procesos de registro, generación, expedición, y usabilidad de la identificación digital.

**Palabra(s) Clave(s):** Autenticación, delito, servicios electrónicos, sitio de redes sociales, suplantación de identidad.

## 1. Introducción

Un mecanismo de autenticación se compone de los procesos de identificación y validación [1]. El proceso de identificación permite al usuario presentar su credencial; mientras que, el proceso de validación permite a la autoridad verificar la legitimidad de dicha credencial. El resultado de una autenticación positiva otorgará permisos o privilegios al usuario dentro del sistema. En Internet, el mecanismo de autenticación más utilizado es la combinación de usuario-contraseña [1]. Sin embargo, un proceso clave para todo mecanismo de autenticación es el registro de los usuarios. El proceso de registro [1] de usuarios permite corroborar la información de un usuario antes de otorgarle su identificador dentro del sistema.

El registro de usuarios en Internet se realiza por medio del formulario de registro web. El formulario de registro web permite recolectar información personal de cada usuario para su almacenamiento posterior. Por medio del formulario de registro web, se puede validar el formato utilizado en cada campo o que todos los campos se encuentren completados [2]. Una vez concluido el llenado del formulario de registro web, se procede a enviar los datos personales al servidor remoto. Los datos personales son transmitidos a través de un canal de comunicación seguro, utilizando certificados digitales [3] y el protocolo *Secure Socket Layer* (SSL) [4] o *Transport Layer Security* (TLS) [5], en la mayoría de los casos. No obstante, el formulario de registro web no tiene la capacidad de corroborar la veracidad de los datos utilizados por los usuarios de Internet. Es decir, un usuario de Internet puede utilizar información falsa o robada para completar un formulario de registro web.

El hecho de la falta de un procedimiento o mecanismo que permita corroborar la veracidad de los datos utilizados para crear una cuenta de usuario y ser miembro de un sistema, ha permitido que usuarios maliciosos realicen acciones delictivas, como son: acoso sexual, operaciones comerciales fraudulentas, suplantación de identidad, trata de personas, entre otras. Lo anterior se ve reflejado en el número creciente de denuncias relacionadas con delitos realizados a través de sitios de redes sociales<sup>1,2</sup> o en el número de quejas por compras no reconocidas con tarjetas de crédito/debito<sup>3,4</sup>.

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente forma. En la sección 2, se describen tres ataques realizados para demostrar lo vulnerable que es el ciberespacio. En la sección 3, se introduce la identificación digital – sus componentes – y su infraestructura – centros y procesos. Se presenta un análisis de seguridad sobre el uso de la identificación digital en el ciberespacio, en la sección 4. Finalmente, se dan las conclusiones en la sección 5.

## **2. Ataques a sitio de red social y servicio electrónico**

Para ilustrar el problema, se presenta brevemente una serie de ataques realizados al sitio de red social más popular en México y a uno de los servicios de correo electrónico más utilizados en Latinoamérica.

Primero, se decidió crear una identidad falsa a partir de nombres poco comunes. La identidad falsa tiene los siguientes datos: fecha de nacimiento, lugar de residencia, colegios, grados académicos, entre otros. Una vez creada la identidad falsa, se completó el formulario de registro web para crear una cuenta de correo electrónico, utilizando la identidad falsa. La cuenta de correo electrónico se generó sin ningún contratiempo. Posteriormente, se procedió a crear una cuenta de

---

<sup>1</sup> [http://www.milenio.com/politica/Condusef-robo\\_de\\_identidad\\_0\\_707929207.html](http://www.milenio.com/politica/Condusef-robo_de_identidad_0_707929207.html)

<sup>2</sup> <http://www.interpol.int/es/Criminalidad/Delitos-contramenores/Delitos-contramenores>

<sup>3</sup> <http://ntrzacatecas.com/2014/03/09/alerta-condusef-por-cargos-no-reconocidos-en-tarjetas-bancarias/>

<sup>4</sup> <http://www.razon.com.mx/spip.php?article174743>

usuario en el sitio de red social con la misma identidad falsa y el correo electrónico. Al finalizar el procedimiento, se obtuvo una cuenta de usuario.

Para dar continuidad al ataque, se decidió enviar solicitudes de amistad a usuarios que tuvieran gustos en común con nuestro usuario falso. Al paso del tiempo, la cuenta de usuario continúa incrementando su número de amigos y es miembro de algunos grupos.

Las actividades se han realizado en diferentes lugares – cibercafés y redes inalámbricas abiertas –, se ha cambiado la dirección MAC del equipo, y se ha utilizado más de un equipo de cómputo para reducir la posibilidad de ser detectados. También, se pueden utilizar algunas herramientas para crear cuentas de usuario con información falsa o robada.

En conclusión, se ha demostrado lo fácil que es crear una cuenta de usuario debido a la falta de un procedimiento o mecanismo de verificación de identidad.

### **3. Identificación digital e infraestructura para crear cuentas de usuarios en el ciberespacio**

A partir del análisis presentado en la sección anterior, se propone una identificación digital. La identificación digital tiene el objetivo de presentar información de cada ciudadano para reemplazar el uso del formulario de registro web. Se puede entender a la identificación digital como la representación electrónica de un documento de identificación, estructurado lógicamente con información de un ciudadano, para conocer su identidad en el proceso de creación de una cuenta de usuario en sitios de red social o servicios electrónicos, privados o públicos. La identificación digital se encuentra constituida por las siguientes categorías:

- La categoría de identidad del ciudadano contiene información personal de cada ciudadano para su identificación. El iris es el rasgo biométrico que hará único al ciudadano en el sistema. La foto será de color blanco y negro debido al bajo costo del tamaño en bytes.
- La categoría de domicilio del ciudadano presenta la dirección física del ciudadano que contiene la credencial para votar.



- La categoría de historial delictivo servirá para conocer los antecedentes penales de los ciudadanos y poder prevenir ataques.
- La categoría información del documento servirá para validar la veracidad de la identificación digital y evitar falsificaciones.

En la tabla 1, se presentan los datos para la identificación digital de cada ciudadano.

Tabla 1 Estructura de la identificación digital.

Categoría	Componente	Tipo y Longitud	Requerido	Tamaño en Bytes
Identidad del ciudadano	Apellido P.	Alfabético (20)	SI	160
	Apellido M.	Alfabético (20)	SI	160
	Nombre	Alfabético (20)	SI	160
	Iris	N/A	SI	688
	Foto	JPG	SI	3747.84
	CURP	Alfanumérico (18)	SI	144
Domicilio del ciudadano	Calle	Alfanumérico (30)	SI	240
	Número exterior	Numérico (5)	SI	40
	Colonia	Alfanumérico (30)	SI	240
	Código Postal	Numérico (5)	SI	40
Historial delictivo	Antecedentes penales	Alfabético (2)	SI	16
	Fecha de solicitud	Alfanumérico (10)	SI	80
Información del documento	Expedición	Alfanumérico (10)	SI	80
	Vigencia	Alfanumérico (10)	SI	80
	ID del documento	Numérico (13)	SI	104
	Huella digital del emisor	Hexadecimal (32)	SI	256
Byte				6,235.84
<b>KiloByte</b>				<b>6.089</b>

Para poder hacer uso de la identificación digital, se ha definido la siguiente infraestructura. Se debe entender como infraestructura a cada componente necesario para utilizar la identificación digital. Los componentes principales que se han definido son:

- Centro de emisión: es la dependencia encargada de generar la identificación digital y entregar el documento al ciudadano.
- Centro de registro: es la dependencia encargada de recibir la documentación e información del ciudadano.

- Centro de validación: es la dependencia encargada de verificar la legitimidad de los documentos e información del ciudadano.
- Ciudadano: es el solicitante de la identificación digital y puede tener nacionalidad mexicana o extranjero con residencia legal en la República Mexicana.
- Terceros: dependencias gubernamentales o iniciativa privada que requiere información personal de ciudadanos mexicanos o extranjeros con residencia legal para crear una cuenta o vender un producto y/o servicio a través de un medio digital.
- Los componentes secundarios que se han definido son:
- Políticas: es el plan de acción para recibir, evaluar, dictaminar, y emitir la identificación digital de cada ciudadano. También, se incluyen las acciones a seguir para rechazar y cancelar una identificación digital. Adicionalmente, se presentan las acciones a seguir en caso de una incidencia. Se entiende por incidencia a toda aquella acción legal relacionada con la identificación digital.
- Leyes: son las normas jurídicas emitidas por el poder legislativo en México y son todas aquellas que se encuentren relacionadas con documentos o transacciones digitales. Por ejemplo, la ley de privacidad de datos personales en posesión de particulares [6].
- Host: es todo equipo de cómputo y software que se utilizará para recibir, evaluar, dictaminar, emitir, rechazar, y cancelar la identificación digital.
- Equipo de trabajo: son todas las personas que trabajarán para recibir, evaluar, dictaminar, emitir, rechazar, y cancelar la identificación digital.
- Red de comunicaciones: es todo el equipo de comunicaciones que se utilizará para interconectar a los Host hacia el interior y exterior.

A continuación, se explica cada uno de los componentes principales.

- Centro de emisión: es el encargado de generar y entregar la identificación digital al ciudadano. La generación involucra el proceso de la firma digital

que vincula los datos del ciudadano con el centro de emisión. El centro de emisión tendrá la siguiente jerarquía (figura 1).

- Principal: es el centro de emisión nacional que mantiene la información actualizada de los centros de emisión de segundo nivel.
- Segundo nivel: es el centro de emisión local que se encuentra accesible a los ciudadanos. Existirá un centro de emisión de segundo nivel por localidad. Su función es entregar la identificación digital a los ciudadanos.

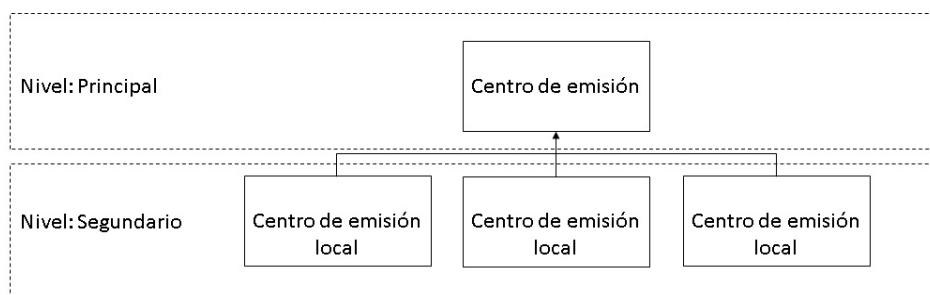


Figura 1 Jerarquía del centro de emisión.

- Centro de registro: se encuentra constituido por todas las oficinas del INE, y tienen por misión realizar las funciones de asistencia al centro de emisión local en los procedimientos y trámites relacionados con los ciudadanos para su identificación, registro, y validación de documentos para garantizar la correcta expedición de la identificación digital. En el supuesto que, una localidad no cuenta con oficinas del INE, se utilizara una unidad móvil para realizar la identificación, registro, y validación de documentos.

En lo particular, los ciudadanos menores de edad que deseen obtener su identificación digital deberán realizar el procedimiento a través de la Secretaría de Educación Pública de su estado. La Secretaría de Educación Pública se limitará a validar la información y no emitirá bajo ninguna circunstancia la identificación digital.

- Centro de validación: tiene como función comprobar el estado e información de la identificación digital para ciudadanos mexicanos y extranjeros con documentos en regla. El protocolo para la validación de la información se

desarrollará posteriormente debido a que no es la finalidad del presente documento proponer un protocolo de intercambio de información. La función principal es garantizar que la información sea correcta y no afecte la reputación de un ciudadano, y en el caso de realizar actividades ilegales se procederá a proporcionar la información personal a las autoridades.

Se tiene contemplado tener varios centros de validación distribuidos en el interior de la República Mexicana para no saturar un servidor y balancear la carga de peticiones, incrementado la disponibilidad del servicio de consulta a terceros. La figura 2 presenta un escenario en donde un tercero desea validar la información de un ciudadano. El tercero tiene la opción de elegir entre tres centros de validación. En el caso que ocurra una falla con el primer centro de validación, se puede proceder con el segundo centro de validación, y así sucesivamente.

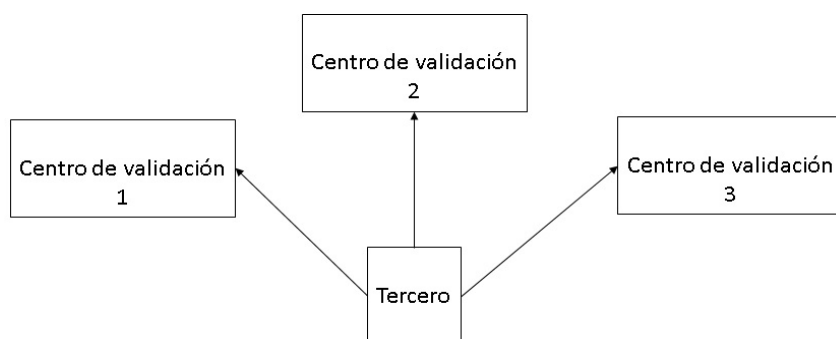


Figura 2 Escenario de validación de información por un tercero.

- Ciudadano: en el ámbito de la identificación digital, se entiende como ciudadano a toda persona física con nacionalidad mexicana o extranjero con residencia legal en México que por su propia voluntad solicita su identificación digital. El ciudadano debe mostrar documentos que lo relacionen con sus datos personales.

En lo particular, los ciudadanos menores de edad deberán ir acompañados de un responsable legal y ambos deberán acudir por su propia voluntad para solicitar la identificación digital. Así mismo, se deberán presentar documentos personales de ambos.

- Terceros: en el ámbito de la identificación digital, se entiende como tercero a toda persona física o moral y dependencia gubernamental que solicita datos personales a ciudadanos mexicanos o extranjeros con residencia legal en México para crear una cuenta de usuario en un sistema web o móvil y/o para realizar una transacción comercial a través de medios digitales.

A continuación, se describen los procesos de registro y usabilidad de la identificación digital.

El proceso de registro sirve para que un ciudadano obtenga su identificación digital (figura 3).

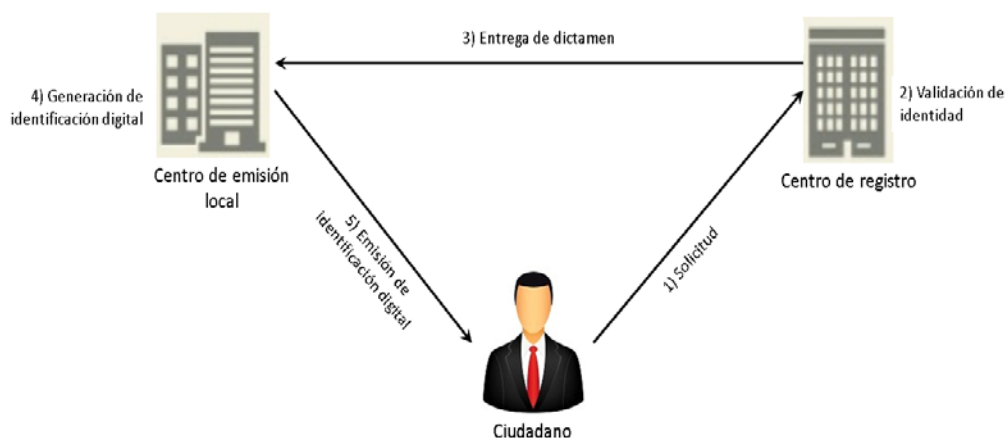


Figura 3 Proceso para obtener la identificación digital.

El ciudadano debe acudir físicamente al centro de registro más cercano a su domicilio con la documentación probatoria sobre su identidad (paso 1). El grupo de trabajo del centro de registro recibirá la documentación y procederá a validarla (paso 2). En caso que el proceso de validación sea positivo, se procederá a escanear el iris del ciudadano para generar la plantilla. Una vez generada la plantilla y verificada su funcionalidad, se procederá a emitir una solicitud de generación que será enviado al centro de emisión local (paso 3). El centro de emisión local se encargará de generar la identificación digital en base a la información proporcionada por el centro de registro (paso 4). Una vez concluida la generación de la identificación digital, se procederá a firmar digitalmente dicho

documento, y en caso de ser necesario, se procederá a cifrar la identificación digital con la clave pública del centro de evaluación. Finalmente, se entrega la identificación digital al ciudadano de manera física (paso 5).

Es importante mencionar que, se tiene contemplado agendar cita para asistir a solicitar y entregar la identificación digital.

El proceso propuesto para que un ciudadano pueda crear una cuenta de usuario en un sitio de red social o un sistema web, se presenta en la figura 4.

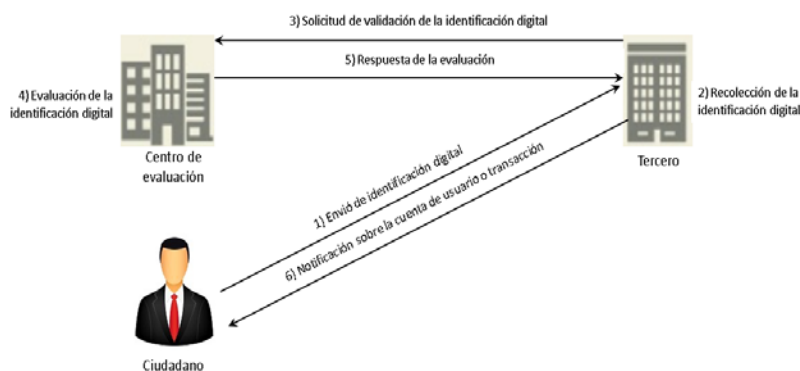


Figura 4 Proceso para crear una cuenta en una red social o en un sistema web.

El ciudadano debe utilizar un equipo de cómputo o un dispositivo móvil y conexión a Internet para crear una cuenta de usuario o realizar una transacción electrónica. En ese momento, el Tercero le solicitará su información personal para crear la cuenta de usuario o realizar la transacción comercial. El ciudadano enviará su identificación digital al tercero a través de un canal de comunicación seguro que se puede establecer utilizando el protocolo SSL y certificados digitales (paso 1). Una vez recibida la identificación digital, el tercero procederá a almacenar la identificación digital (paso 2). Una vez almacenada, se enviará la petición de validación al centro de validación a través de un canal de comunicación seguro (paso 3). El centro de validación tendrá que evaluar la validez de la identificación digital por medio de la verificación de la firma digital (paso 4). El resultado de la evaluación será enviado al tercero (paso 5). En caso de recibir un resultado positivo, el tercero generará la cuenta de usuario o continuará con la transacción comercial. Finalmente, el resultado será notificado al ciudadano (paso 6).

La seguridad de la identificación digital e infraestructura se encuentra dada por:

Protocolos criptográficos que permiten asegurar un canal de comunicación abierto, como es Internet, mantener la confidencialidad de información y evitar el repudio. Se tienen dos escenarios para establecer un canal de comunicación seguro. El primer escenario, se refiere al uso del chip criptográfico para almacenar la identificación digital y el canal de comunicación se debe establecer desde el chip criptográfico hasta el servidor web remoto [7]. El segundo escenario, se refiere al uso de la identificación digital en una memoria USB y el canal de comunicación se debe establecer desde el navegador web del usuario hasta el servidor web remoto.

La diferencia entre los escenarios se debe al uso del chip criptográfico. El chip criptográfico tiene la capacidad de calcular operaciones criptográficas y su acceso es restringido por un número de identificación personal (NIP). Por lo tanto, se puede calcular protocolos criptográficos como son Diffie-Hellman [8], RSA [9] y funciones hash [10], con sus recursos propios, incrementando la seguridad. Por el contrario, la memoria USB carece de dichas características, y por lo tanto, se debe utilizar los recursos de la computadora y del navegador Web.

El canal de comunicación se puede establecer por medio de un protocolo Diffie-Hellman o SSL. En donde, se establece una clave de sesión para cifrar los paquetes.

También, se recuerda que en el escenario de la memoria USB, la identificación digital deberá estar cifrada con RSA 2048 bits. El resultado es mantener la confidencialidad de la información del ciudadano en caso de robo o extravío.

La representación sería:

$$C = (\textit{Identidad Digital})^e (\textit{mod } n)$$

Donde  $C$  es la identificación digital cifrada,  $e$  y  $n$  es la dupla que conforma la clave pública del centro de emisión

En el supuesto que, el ciudadano pierda su memoria USB y otro ciudadano desee conocer la información almacenada en la identificación digital, se verá frustrado debido a no poder descifrar  $C$  sin conocer la clave privada ( $d$ ) del emisor.

También, se utiliza la firma digital en la identificación digital para verificar su originalidad y validez. La firma digital permite verificar la validez de los datos

almacenados en la identificación digital, debido a que, se realiza por el centro de emisión.

La representación está dada por la ecuación 1.

$$FD = (H(\text{Identificación Digital}))^d \pmod{n} \quad (1)$$

Donde:

$H$  Resumen de la identificación digital a través de una función hash SHA-2 o MD5

$FD$  Firma digital de la identificación digital

$d$  y  $n$  Dupla que conforma la clave privada del centro de emisión

A través de la firma digital, el centro de validación podrá verificar que la información personal del ciudadano es válida. En caso de que algún usuario malicioso decida realizar el ataque de robo de identidad y generar su propia identificación digital, el centro de validación podrá reconocer el ataque cuando realice la verificación de la firma digital. El resultado será el rechazo de la identificación digital, y por consiguiente, la petición de crear una cuenta o realizar una transacción comercial será rechazada.

#### 4. Evaluación de seguridad

Con la intención de explicar la seguridad de la infraestructura propuesta, se presenta una evaluación de seguridad.

La comunicación entre el ciudadano y el centro de registro se realizará de manera personal y con la documentación en regla. La documentación será verificada por el equipo de trabajo. En caso de encontrar alguna inconsistencia se rechazará la solicitud.

El rasgo biométrico permitirá identificar a un ciudadano con una tasa de error menor que con la huella dactilar. La plantilla del rasgo biométrico será incluida en la identificación digital para poder verificar la identidad del ciudadano en cualquier momento. Además, la inclusión de un rasgo biométrico reducirá ataques de suplantación y robo de identidad. También, se espera reducir el préstamo de la



identificación digital a un atacante o para hacer acciones maliciosas debido a que la plantilla servirá para identificar al propietario de la identificación digital.

El registro y emisión de la identificación digital ha sido dividido en dos dependencias diferentes para evitar coacción y coerción para beneficiar a un ciudadano o grupo de ciudadanos; es decir, se busca reducir la corrupción.

El centro de emisión local se encarga de generar la identificación digital y el equipo de trabajo del centro de registro no conocerá, ni tendrá acceso a los host y/o políticas de seguridad. Se espera tener independencia entre ambos centros y reducir ataques desde el interior.

La identificación digital será almacenada en un chip criptográfico para proteger su integridad. También, se ha considerado el caso en donde la identificación digital se almacena en una memoria USB para su traslado y uso. La identificación digital será cifrada utilizando el algoritmo RSA con 2048 bits de longitud de clave.

La identificación digital será enviada a través de un canal de comunicación seguro establecido por el protocolo SSL o Diffie-Hellman.

La verificación de los datos almacenados en la identificación digital se realizará por medio del centro de validación. Esto significa que, el tercero no tendrá la responsabilidad de verificar los datos y se delegará la responsabilidad a un centro de validación. La validación se realizará utilizando la firma digital.

Los centros de validación serán distribuidos para que cada tercero pueda decidir con cual centro de validación confiar y establecer la comunicación. De esta manera, se podrá dar la oportunidad a los terceros de elegir el o los centros de validación más cercanos o de mayor confianza.

## **5. Conclusiones**

La suplantación de identidad es un problema que puede afectar a cualquier ciudadano, y por lo tanto, nadie se encuentra exento. Inicialmente, el problema se extendió del mundo real al mundo virtual debido a la facilidad que se tiene para crear una cuenta de usuario y poder realizar diferentes acciones. Sin embargo, se ha detectado que la información personal proporcionada en los sitios de redes sociales es suficiente para robar su identidad y suplantar a una persona.

Con la intención de proponer una solución al problema, se ha introducido la primera identificación digital cuya finalidad es contener información verificable de un ciudadano mexicano. Además, se han definido los componentes de una infraestructura que pueda soportar el uso de la identificación digital a través del ciberespacio. La infraestructura cuenta con tres centros entre el que se encuentra el centro de validación. El centro de validación es el encargado de verificar la validez de la identificación digital y del contenido. Por medio de la identificación digital, se pueden crear cuentas de usuario con información real, incrementado la seguridad en sitios de redes sociales y en transacciones electrónicas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] L. Rebollo Delgado, M. M. Serrano Pérez, Introducción a la protección de datos. 2008. DYKINSON, S.L. Madrid.
- [2] A. Ramos Martín, M. J. Ramos Martín, Aplicaciones Web. 2014. Ediciones Paraninfo, S.A. Madrid.
- [3] ITU-T, The Directory: Public-key and attribute certificate frameworks. IETF. 2005.
- [4] A. Freier, P. Karlton, P. Kocher, The Secure Sockets Layer (SSL) Protocol Version 3.0. IETF. 2011.
- [5] T. Dierks, C. Allen, The TLS Protocol Version 1.0. IETF. 1999.
- [6] Cámara De Diputados Del H. Congreso De La Unión, Ley Federal de Protección de Datos Personales en Posesión de los Particulares. Diario Oficial de la Federación. 2010.
- [7] A. Ali, K. Lu, M. Montgomery, "Network Smart Card - A new paradigm of secure online transactions". 20th International Information Security Conference. 2005.
- [8] W. Diffie, M. Hellman, "New directions in cryptography". IEEE Transactions on Information Theory. Vol. 22. No 6. 1976. Pp. 644-654.
- [9] R. Rivest, A. Shamir, L. Adleman, "A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems". Communications of the ACM. Vol. 21. Vo 2. 1978. Pp. 120-126.

[10] R. Rivest, The MD5 Message-Digest Algorithm. IETF. 1992.

## **7. Autores**

Francisco Roger Cortes Martínez es egresado de la ingeniería de software de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Sus áreas de interés son desarrollo de software y seguridad informática.

Ángel Daniel Herrera Candelaria es egresado de la ingeniería de software de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Sus áreas de interés son desarrollo de software y seguridad informática.

Rafael Martínez Peláez es doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña e ingeniero en sistemas computacionales por la Universidad del Valle de México en 2010 y 2003, respectivamente. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad de la Salle Bajío y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI.) con el nombramiento de candidato. Sus áreas de interés son autenticación, seguridad en servicios electrónicos, y privacidad en redes sociales.

Yesica Imelda Saavedra Benítez es doctora por la Universidad de Versalles e ingeniera en computación por el Instituto Tecnológico de Toluca en 2013 y 1997, respectivamente. Actualmente, es profesora de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Toluca y directora del laboratorio de investigación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) con el nombramiento de candidato. Sus áreas de interés son redes inalámbricas ad-hoc, redes de sensores y seguridad en redes inalámbricas.

Pablo Velarde Alvarado es doctor y maestro en ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzado del IPN e ingeniero en electrónica por la Universidad Autónoma de Guadalajara en 2009, 2001 y 1993, respectivamente. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Nayarit y miembro del cuerpo académico de nuevas tecnologías aplicadas a la educación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores con el nombramiento de nivel I. Sus áreas de interés son sistemas de detección de intrusiones, entropía y seguridad en redes.

# ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE MONITOREO Y GENERACIÓN DE NOTIFICACIONES EN GNU/LINUX MEDIANTE AGENTES PARA UN SISTEMA DE GESTIÓN DIGITAL

***Rafaela Blanca Silva López***

Universidad Autónoma Metropolitana

*r.silva@correo.ler.uam.mx*

***Viridiana Matías Hernández***

Universidad Autónoma Metropolitana

*vmatiashdez@gmail.com*

***Israel Isaac Montes de Oca Solís***

Universidad Autónoma Metropolitana

*isaac.i.montes@gmail.com*

***Hugo Pablo Leyva***

Universidad Autónoma Metropolitana

*hpl@correo.azc.uam.mx*

## Resumen

Es prioritario mejorar el desempeño y la eficiencia de los procesos administrativos de las Instituciones de Educación Superior (IES), para lo cual se requiere de Sistemas de Gestión Digital (SGD) que apoyen las funciones sustantivas de la IES y ofrezcan mecanismos para mantener la disponibilidad de los servicios. El objetivo fue diseñar la Arquitectura del Sistema de Monitoreo y Generación de Notificaciones (SMGN) basada en agentes. La función de los agentes fue el monitoreo de servidores y servicios en tiempo real, integrando el envío de notificaciones y generación de estadísticas. La implementación del SMGN se probó con los servidores donde se localizan los componentes del SGD, los resultados obtenidos son satisfactorios, se obtuvieron mejores tiempos de

respuesta al atender las fallas antes de que el usuario se percate de que el servicio no está activo. Por tanto, el SMGN se encarga de mejorar la eficiencia y disponibilidad de los servicios del SGD, mejorando la productividad, los tiempos de respuesta y la atención para la comunidad universitaria, beneficiando hasta a 3960 usuarios de la IES con una inversión mínima [1].

**Palabra(s) Clave(s):** agentes, automatización de procesos, gestión de procesos, gestión del rendimiento, monitoreo de servicios.

## **1. Introducción**

Fomentar la competitividad en las Instituciones de Educación Superior (IES), es un mandato prioritario, por tal razón la gestión educativa debe transformarse y adoptar nuevos paradigmas que integren la gestión de los procesos, las personas y los recursos. Existen proveedores (SAP, Oracle, IBM y Microsoft., entre otros) que proporcionan soluciones para la gestión del rendimiento. Sin embargo, son muy costosas, no se ajustan a las necesidades de una IES y no incluyen mecanismos de monitoreo que garanticen la disponibilidad permanente de los servicios.

La eficiencia de los centros educativos ha sido una de las principales preocupaciones de teóricos y prácticos en educación [2,3]. Es fundamental en una Institución de Educación Superior mejorar el desempeño y la eficiencia de los procesos administrativos en beneficio de la comunidad universitaria, lo que demanda en una Institución innovadora repensar las formas de gestión [4]; cuando hablamos de gestión nos referimos a los procesos educativos, administrativos, sociales, laborales, pedagógicos y tecnológicos [5], orientados al cumplimiento de la misión Institucional [6]. Lo anterior vislumbra la necesidad de contar con un Sistema de Gestión Digital para las IES. Al hablar de la gestión digital nos referimos a la automatización de procesos clave que facilitan la toma de decisiones estratégicas al interior de una Institución tomando como base el modelado de procesos [1].

Desde el punto de vista tecnológico, existen herramientas comerciales y open source dedicadas a los servicios de monitoreo. Los proveedores ofertan desde

servicios básicos hasta la infraestructura completa, podemos mencionar a Openview [7], PRTG Network Monitor [8], Nagios [9], Logstash [10] y Kibana [11], entre otros, si bien son de utilidad resultan ser complejas para configurar, requieren de muchos recursos y tienen un costo elevado, por lo que no están al alcance de las IES. El objetivo de este trabajo fue diseñar la arquitectura del sistema de monitoreo y generación de notificaciones de los servicios ofrecidos por un Sistema de Gestión Digital (SGD), mediante agentes.

El Sistema de Monitoreo y Generación de Notificaciones (SMGN) evalúa los eventos que se presentan en los servidores donde se encuentra instalado el SGD, cuando se detecta una falla se envía una notificación al administrador para que resuelva el problema antes de que el usuario perciba la falla. Garantizando la disponibilidad de los servicios que ofrecen los servidores donde se encuentran instalados los componentes del SGD, lo que provoca mayor disponibilidad de los servicios. El SGD mejora la productividad, los tiempos de respuesta y la atención para la Comunidad Universitaria. En otras investigaciones se ha concluido que el SGD beneficia a 3960 usuarios al interior de la IES con una inversión mínima que permitirá mejorar la productividad y los tiempos de respuesta [1].

### **El Sistema de Gestión Digital**

La arquitectura del Sistema de Gestión Digital se basa en la propuesta del meta-modelo de procesos clave departamental de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) [1]. El modelado de procesos se categoriza en tres niveles: procesos estratégicos, operativos y de apoyo, lo que permite concebir la gestión como un sistema de componentes interrelacionados [12].

En la meta-modelo de procesos del Sistema de Gestión Digital de la UAM, los procesos se clasifican en tres niveles (figura 1). En el nivel principal se encuentran los procesos estratégicos donde se ubica la planeación, la presupuestación y la vinculación (generadores de ingresos). Seguido por el nivel de procesos sustantivos en los que se incluye la docencia, la investigación, la preservación y difusión de la cultura (funciones sustantivas de la Universidad), también se incorporan los procesos asociados con el apoyo a los alumnos a través de becas y

la gestión de proyectos patrocinados. Por último los procesos de apoyo integran los procesos de contratación, prestaciones, recursos financieros, servicios, editorial y comunicación.

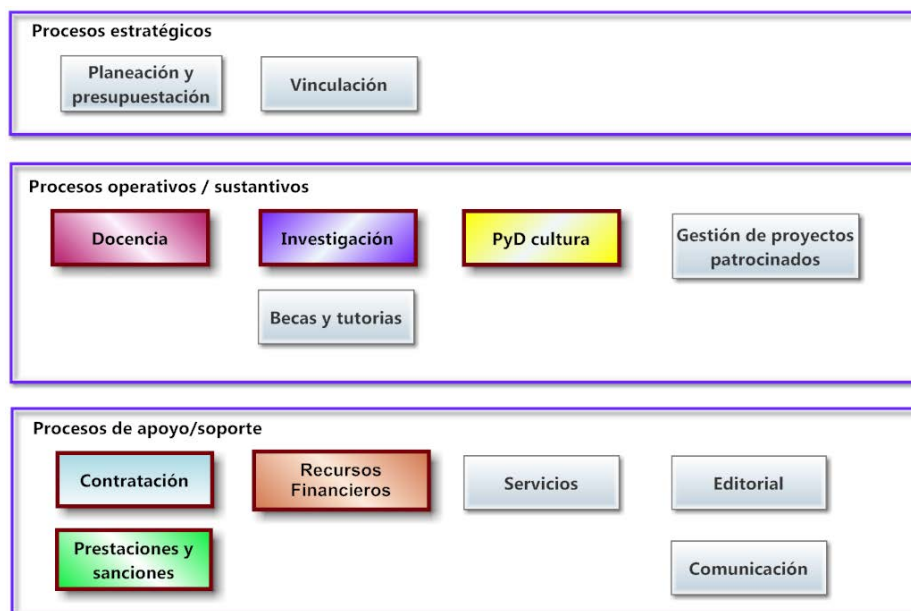


Figura 1 Meta-modelo de procesos del Sistema de Gestión Digital de la UAM.

### Arquitectura organizacional del Sistema de Gestión Digital

Como caso aplicativo se ha decidido trabajar con la Unidad Lerma, dado que es el campus de más reciente creación de la UAM, cuenta con recursos limitados lo que provoca una necesidad de sistemas informáticos que apoyen al personal administrativo para la realización de los procesos que las otras Unidades aplican sin problema por tener el personal necesario para cada actividad.

Las actividades administrativas involucran: autoridades, profesores-investigadores, personal administrativo, alumnos, y a otros actores de la comunidad universitaria. Esto requiere de la continuidad del servicio las 24 horas del día de los 365 días del año.

Dos profesores-investigadores están a cargo de la administración de los servidores dónde se alojan las bases de datos, herramientas y aplicaciones, debido a la diversidad de responsabilidades en cuanto a docencia, investigación y gestión, no pueden estar monitoreando de manera permanente los servicios que

soportan el SGD. Por tanto, para garantizar un buen servicio, es necesario contar con mecanismos automatizados para monitorear los servicios y notificar fallas detectadas mediante correo electrónico al responsable y realice las acciones correctivas correspondientes para resolver el problema antes de que sea notificado por el usuario final.

Bajo este contexto, se propone la arquitectura del sistema de monitoreo y generación de notificaciones en GNU/Linux [13]. El desarrollo de los sistemas que soportan las actividades clave de la Unidad, consideran las recomendaciones del modelo de referencia de arquitectura empresarial de: The Open Group Architecture Framework (TOGAF) [14].

TOGAF propone un modelo a capas en las que integra la arquitectura tecnológica, datos, aplicaciones y negocios. En la arquitectura tecnológica o de infraestructura considera los requerimientos de hardware y software, así como lo relacionado con el uso de la red. Mientras que la arquitectura de datos considera la información que se va a resguardar, administrar y analizar. Por otro lado, la arquitectura de aplicaciones incorpora los servicios automatizados que requiere el negocio (en nuestro caso la Institución). Finalmente en la arquitectura de negocios se realiza el mapeo de procesos de negocio, integra la estructura organizacional y a las personas involucradas (figura 2).

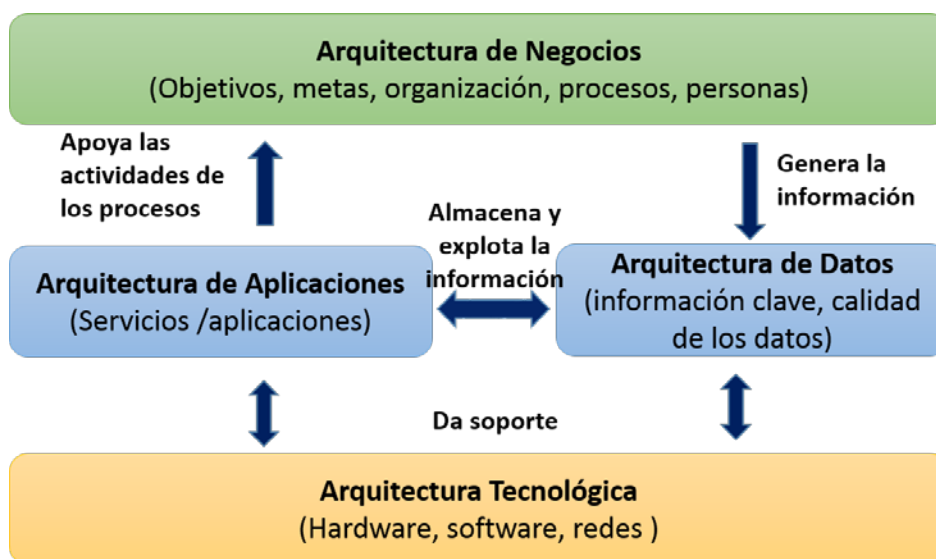


Figura 2 Arquitecturas que considera TOGAF 9.1.



En el Sistema de Gestión Digital se trabajó en la arquitectura de negocios obteniendo como resultados el meta-modelo de procesos del Sistema de Gestión Digital. Mientras que en la arquitectura de las aplicaciones encargadas de servicios de docencia (gestión de tutores y manejo de becas, por ejemplo), se diseñó una base de datos que integra todo lo que requieren los sistemas que apoyan las actividades de los diferentes procesos. Por último, en la arquitectura tecnológica se incorpora el Sistema de Monitoreo y Notificaciones cuyo objetivo es detectar fallas y promover la disponibilidad de servicios que la Institución requiere.

### **Arquitectura tecnológica del Sistema de Gestión Digital**

Vigilar el funcionamiento de servicios, aplicaciones e inclusive los propios servidores que conforman la infraestructura tecnológica de toda organización, es una tarea esencial. Por lo que se requiere revisar periódicamente las bitácoras de los servicios para detectar alguna anomalía, y realizar las acciones correctivas correspondientes para mantener los servicios funcionando.

Existen diversas herramientas comerciales y open source que ofrecen servicio de monitoreo. A continuación se describen tres de los más usados:

Nagios [9] es una solución open source ampliamente utilizada, provee un servicio de monitoreo por medio de una interfaz web, muestra la topología de la red, permite la programación de plugins adicionales a los que ya incluye la plataforma. Sin embargo su implementación es complicada, requiere de conocimientos técnicos, herramientas adicionales y una inversión de tiempo considerable.

Logstash [10] es una herramienta que extrae datos de las bitácoras sobre eventos que se presentan en los servicios o aplicaciones que están ejecutándose. Para configurarlo se requiere de conocimientos avanzados del sistema operativo, no cuenta con una interfaz gráfica para la configuración, lo que hace que se vuelva compleja.

Openview [7] es una solución comercial de HP, ofrece una arquitectura de tipo consola-agente. Incluye paquetes de software (agentes) para los principales sistemas operativos. Los agentes son independientes de la consola central, se encargan de informar a la consola las excepciones que se presenten, además

monitorean archivos de bitácoras, permite programar tareas, capturar eventos con el protocolo SNMP4 [15], entre otras. Proporciona un mapa lógico de los componentes de la infraestructura y del estado de los servicios monitoreados. Favorece la escalabilidad e integralidad al manejar una gran cantidad de dispositivos. Tiene un costo muy elevado, por lo que es una solución inaccesible para una IES. Estas herramientas son complejas para configurar, requieren de muchos recursos o son costosas, por lo que no están al alcance de las IES.

### **Metodologías para el diseño de la arquitectura del Sistema de Monitoreo y Notificaciones**

Se utilizó la metodología GAIA [16,17] para realizar el diseño de la arquitectura del Sistema de Monitoreo y Notificaciones basado en agentes, se definieron:

- Los requisitos iniciales.
- La organización de los roles y sus relaciones contemplando las responsabilidades del agente, los recursos que utiliza, las tareas realizadas y las interacciones.
- Se determina el tipo de agente, el número de instancias y el modelo de servicios (funciones del agente) asociados a cada rol.
- Los enlaces de comunicaciones que existen entre los agentes.

Por último, para realizar la implementación se aplicó SCRUM, un proceso que contempla un conjunto de buenas prácticas para trabajar colaborativamente. Integra el ciclo de vida de desarrollo de software iterativo incremental en el que se van desarrollando módulos o componentes que se integran al producto final [18].

### **Implementación con agentes reactivos**

El sistema para el monitoreo se implementó mediante el uso de agentes reactivos. Dado que los Sistemas Multi-Agentes (SMA) son herramientas de software que facilitan el monitoreo de múltiples sucesos y enviar notificaciones, o tomar decisiones, los componentes de software (agentes) pueden correr en diferentes equipos de manera concurrente, facilitan la solución de problemas

complejos mediante el uso de un grupo de agentes especializados en acciones sencillas que en su conjunto resuelven un problema complejo [19]. Dada la autonomía de un agente, es posible modelarlos de manera independiente; por tanto, debido a la naturaleza autónoma y proactiva de un agente y las características de manejo de información distribuida, coordinación y comunicación entre agentes, se convierten en la alternativa primordial para la implementación de un sistema de monitoreo de servicios en servidores GNU/Linux.

Se localizaron trabajos cuyo enfoque se asocia con el uso de SMA en el ámbito de las redes y comunicaciones. Su enfoque está asociado a la comunicación entre protocolos [20], la comunicación entre agentes [21] y el monitoreo de redes de computadoras [22].

## **2. Desarrollo**

La solución propuesta ofrece el monitoreo en tiempo real de los servicios que se proporcionan en los servidores de la red a través de una aplicación web. Brinda una configuración simple para la implementación del monitoreo y notificación. Integra un módulo de envío de notificaciones vía correo electrónico en caso de detectar fallos. Además permite la realización de consultas en períodos de tiempo especificados por el usuario sobre datos históricos y actividades monitoreadas. Utiliza software libre, por lo que no genera un gasto fijo de licenciamiento.

Los componentes del SMGN sobre Servidores Linux integran seis módulos:

- Automatización de extracción de las bitácoras.
- Automatización del almacenamiento de las bitácoras.
- Monitoreo de esclavos en servidores.
- Generación de estadísticas.
- Monitoreo de servicios en tiempo real.
- Envío de notificaciones. Los módulos implementados mediante agentes, se interconectan a través de la red con 2 subsistemas.

El subsistema A encargado de la recopilación de información de las bitácoras tal como timestamp (fecha y hora en que ocurre el evento), nombre de evento,

descripción o método para el caso de peticiones de los web servers, IP origen, recurso al que se intentó acceder, el usuario que intentó el acceso, entre otras; y el subsistema B enfocado en el análisis de la información, la generación de estadísticas y la notificación de las fallas que se presentan en los servicios de los servidores involucrados (figura 3).

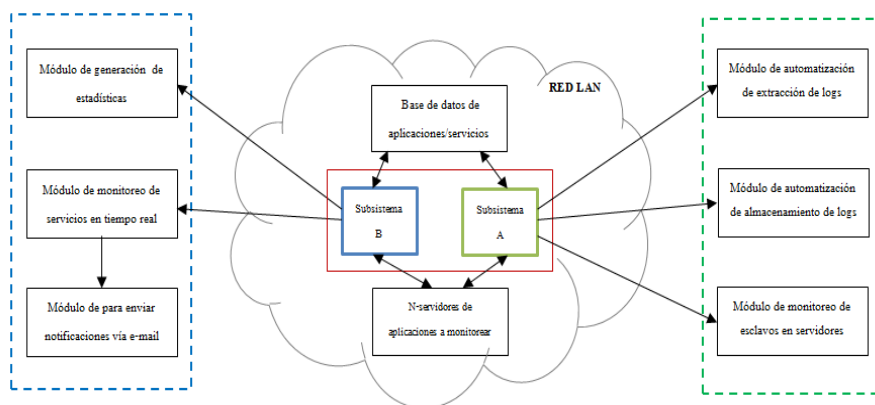


Figura 3 Componentes del SMGN sobre Servidores Linux.

### Arquitectura del Sistema de Monitoreo y Generación de Notificaciones sobre servidores GNU/Linux

La arquitectura del Sistema de Monitoreo y Generación de Notificaciones (SMGN) se compone de 6 agentes, 3 asociados al monitoreo de eventos y automatización, extracción y almacenamiento de bitácoras y 3 relacionados con el monitoreo en tiempo real, la generación de notificaciones y estadísticas. Las relaciones entre los agentes requieren de una infraestructura tecnológica para su funcionamiento: una base de datos, un servidor de aplicaciones y la interfaz gráfica (figura 4).

### Arquitectura tecnológica del módulo monitoreo de servicios en tiempo real

Este módulo es el encargado de monitorear en tiempo real el estado de los servicios que se encuentran en cada uno de los servidores de la red local. Informa al servidor web de los eventos ocurridos. Para la realización de este módulo se implementó la comunicación con sockets bajo el protocolo TCP/IP en python siguiendo una arquitectura cliente-servidor.

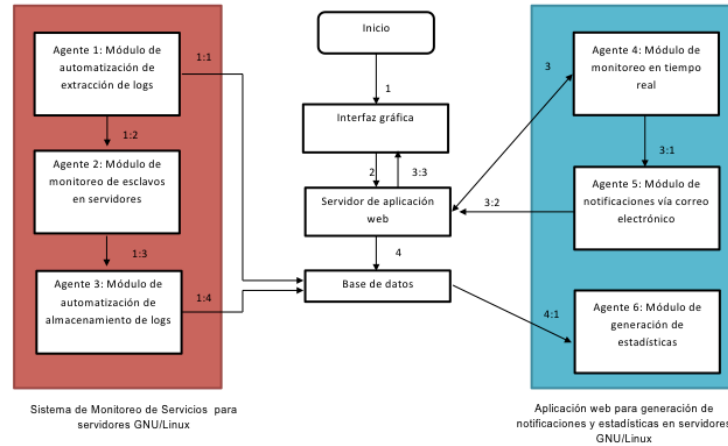


Figura 4 Arquitectura del SMGN.

La arquitectura utiliza tecnologías como Node JS, manejador de base de datos (MongoDB NoSQL, PostgreSQL), servidor Web (Apache Web Server, NGINX), servidor de aplicaciones (Apache TOMCAT), compiladores (Python, entre otros), y sistemas operativos (Linux: Debian, y Centos). Los productos y marcas son propiedad de las empresas correspondientes.

En éste módulo se propone un agente encargado de monitorear las bitácoras de diversos servidores en los que se alojan aplicaciones asociadas con el Sistema de Gestión Digital (agente 4). Además, se diseña un agente encargado de la extracción de información de las bitácoras, en los servidores que se encuentran en producción (agente 3). Por último se integra el agente encargado de la generación de estadísticas (figura 5).

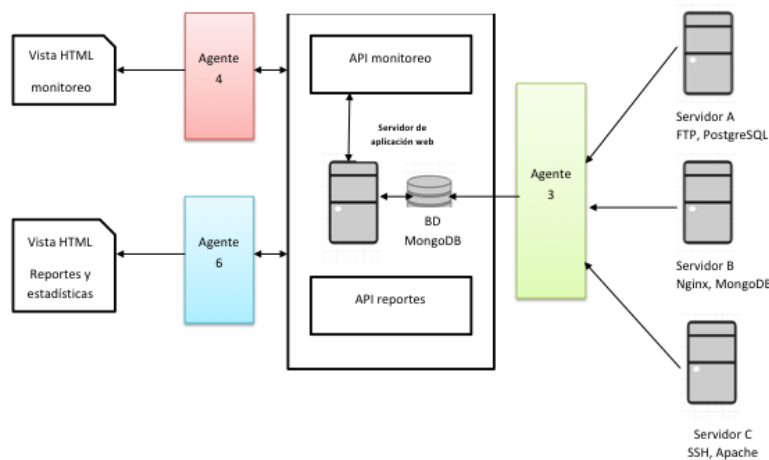


Figura 5 Arquitectura del módulo de servicios en tiempo real.

## Arquitectura del módulo encargado de la generación de notificaciones y estadísticas

Este módulo extrae los datos que son almacenados en la base de datos por el sistema de monitoreo de servicios en sistemas GNU/Linux [20]. Obtiene la información en un rango de tiempo determinado (fecha actual, la última semana o una fecha específica) sobre el estado de los servicios de los servidores que son monitoreados, mostrando una gráfica con el número de eventos exitosos y fallidos del servicio seleccionado.

## Arquitectura del módulo de extracción de datos de las bitácoras

La arquitectura tecnológica de éste módulo contempla la extracción de los datos de las bitácoras asociadas a los servicios que ofrece cada servidor (agentes 1 y 2), además integra los agentes encargados del procesamiento de información extraída de las bitácoras (agente 3). Por último, contempla un agente de control encargado de la periodicidad con la que se procesa la información (agente 7). La interacción entre los agentes y los servidores que alojan los servicios requeridos por el Sistema de Gestión Digital que se deben monitorear se incluyen en este módulo (figura 6).

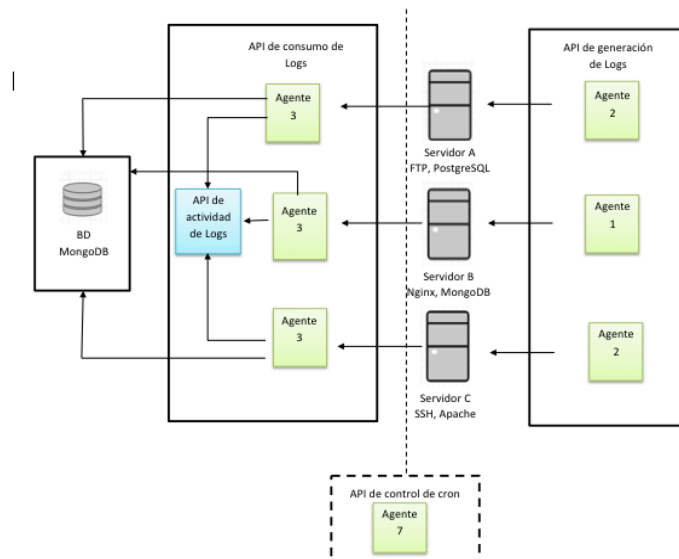


Figura 6 Arquitectura del módulo de extracción de datos de las bitácoras.

Por otro lado, el módulo integra un agente que genera la interfaz gráfica desde la cual se pueden visualizar las alertas y notificaciones del estado de los servicios en los servidores monitoreados. Adicionalmente envía un correo electrónico al detectar alguna falla o estado incorrecto de alguno de los servicios.

La arquitectura del módulo encargado de la generación de notificaciones y estadísticas interactúa con los datos filtrados por los agentes que se encargan de la extracción y procesamiento de datos almacenados en las bitácoras de los servidores que se están monitoreando (figura 7).

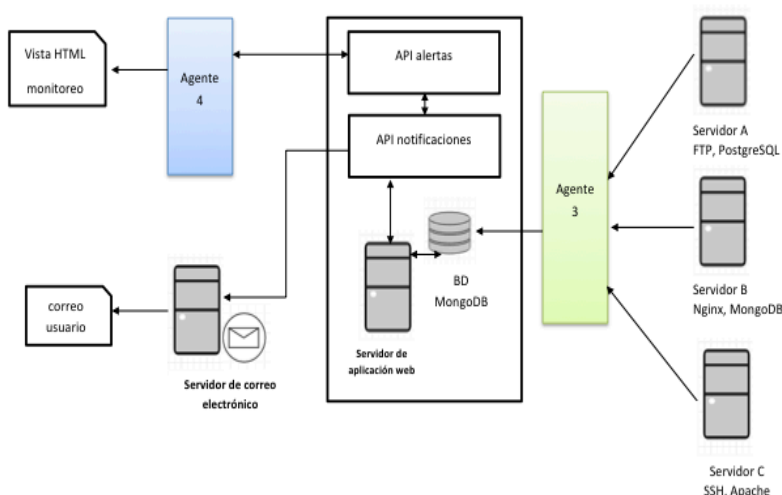


Figura 7 Arquitectura del módulo de notificaciones.

### Monitoreo de Servidores distribuidos en la red

Los servidores en los que se alojan los servicios que soportan al SGD cuentan con sistema operativo Centos versión 6.7, contemplando tanto servidores normales (Servidor Dell con 18 GB RAM, 2 Cores, 2 TB de HD), como servidores virtualizados, bajo una implementación de Cloud Computing. La infraestructura tecnológica con la que se cuenta incluye 4 servidores Blade HP Proliant BL 465c G7, cada uno con 24 microprocesadores AMD Opteron 6174 de 2.199 GHz, con licencia VMware vSphere 5 Desktop y 16 GB de memoria RAM. Utilizan el software VMware vSphere 5 para llevar a cabo la virtualización de los recursos distribuidos de manera dinámica para optimizar los recursos existentes.

## **Actividades realizadas por los agentes**

Para el monitoreo de servicios en tiempo real se utilizaron dos algoritmos para realizar las acciones de estos agentes, uno para las actividades del esclavo (instalado en cada servidor que se monitorea) y otro para las actividades del maestro.

Esclavo: en cada servidor que se monitorea se instaló un cliente que se encargará de ejecutar una serie de comandos para determinar el estatus de cada aplicación y servicio que se monitorea. Una vez que recaba los datos, los envía a la base de datos del servidor maestro. Estos pasos los realiza de manera permanente con un delay de tiempo. Maestro: abre conexión al puerto del socket por el cual cada uno de los esclavos enviará la información de los estatus recabados, se mantiene siempre en escucha. Envía la información que recibe de cada uno de los esclavos a la aplicación web. Los datos que se muestran en la aplicación se obtienen en períodos de tiempo no mayores a 10 segundos.

Para la generación de estadísticas, el algoritmo contempla un componente implementado con servicios REST que realiza la búsqueda de información y separa los datos en errores y aciertos, los datos obtenidos se reflejan en gráficos de la aplicación.

Por último, para el módulo de notificaciones vía correo electrónico, el algoritmo integra la búsqueda en cada uno de los registros obtenidos por los agentes, si se cumplen las restricciones que indican un posible error se toman los datos del registro y se envían por correo electrónico y los registra en la base de datos para poder ser consultados posteriormente desde la aplicación.

## **3. Resultados**

Los resultados muestran que el SMGN proporciona un mecanismo eficiente de monitoreo, permitiendo una mayor disponibilidad de los servicios que apoyan el Sistema de Gestión Digital. Cabe destacar que las pruebas de extracción de todas las bitácoras se hicieron en servicios bajo el sistema operativo Centos 6.7, en servidores normales y servidores virtualizados. El monitoreo de los eventos según



los servicios monitoreados en cada servidor, presenta los eventos sin error para el servicio de apache monitoreado en los diferentes servidores (figura 8).

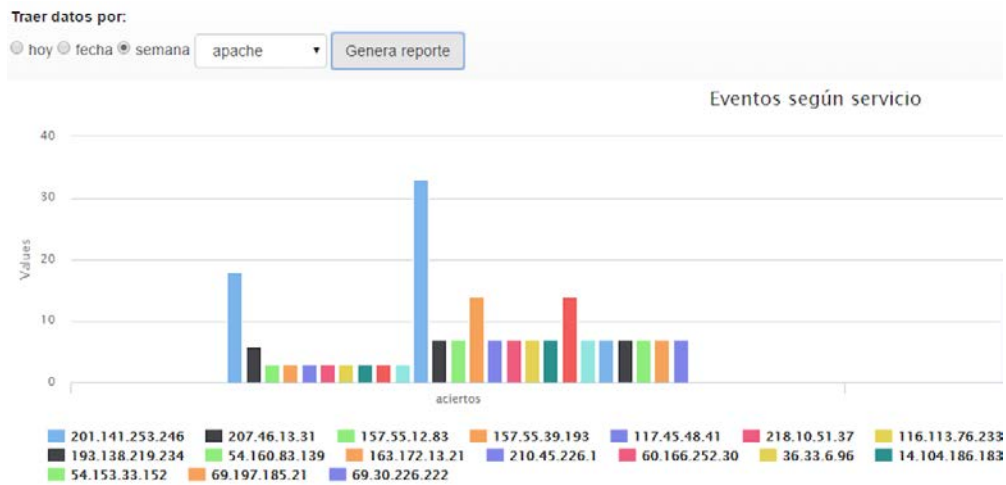


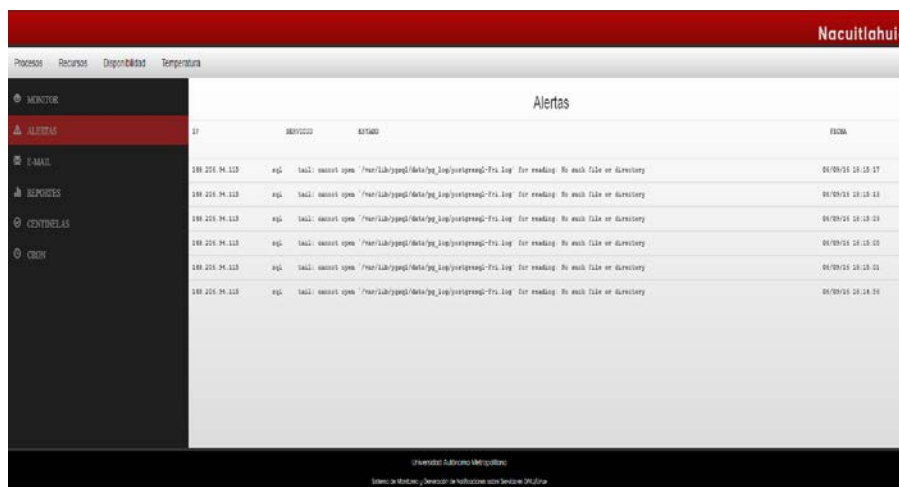
Figura 8 Vista del monitoreo de servicios en los diferentes servidores.

Las pruebas se realizaron sobre distribuciones de Linux; Debian 7, Debian 8 y Centos 6.2 encontrando diferencias en la ejecución de los clientes que realizan el monitoreo, por lo que se hizo una versión de cliente para Debian (7 y 8) y otra para Centos. Los servicios monitoreados fueron nginx, FTP, mongoDB, postgresQL, apache Web Server, Apache Tomcat y SSH en diversos servidores. Los resultados de la extracción de las bitácoras, muestran las direcciones IP de los servidores, los servicios monitoreados y su estado (figura 9).

IP	servicio	tipo	fecha	configuración
148.204.79.19	ssh	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	mysql	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	postgres	éxito	12-04-2016	dia
148.204.79.19	ssh	éxito	12-04-2016	semana

Figura 9 Resultados obtenidos de la extracción de las bitácoras.

En los resultados obtenidos durante el monitoreo de los servidores, se observó que la tasa de eventos por error es relativamente baja (menor al 5%), la mayoría de los errores obtenidos fueron generados de manera intencional para probar el funcionamiento de los módulos y el despliegado de alertas (figura 10).



The screenshot shows a web interface for monitoring servers. The top navigation bar includes 'Procesos', 'Recursos', 'Disponibilidad', and 'Temperatura'. A sidebar on the left contains menu items: 'MONITOR', 'ALERTAS', 'E-MAIL', 'REPORTES', 'CENTRALES', and 'OBS'. The main content area is titled 'Alertas' and displays a table with the following data:

ID	SERVIDOR	ESTADO	FECHA
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:17
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:18
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:19
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:20
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:21
190.205.94.113	egc	tacl: smssst open /near/lib/ypag/Hata/ys_log/ysalgrnag-17a.log for reading: No such file or directory	04/09/16 10:15:22

Figura 10 Despliegado de alertas al realizar pruebas de monitoreo.

#### 4. Discusión

El monitoreo de servidores que deben dar servicio las 24 horas los 365 días del año, deben ser monitoreados en tiempo real para garantizar la disponibilidad del servicio. Para lograrlo se implementaron dos algoritmos que realizan las acciones de los agentes, uno para las actividades del proceso esclavo instalado en cada servidor que se monitorea; en el que se instaló un cliente encargado de ejecutar una serie de comandos para determinar el estado de cada aplicación. El otro (proceso maestro) envía la información que recibe de cada uno de los esclavos a la aplicación web, en periodos de tiempo no mayor a 10 segundos.

Por otro lado, al realizar las pruebas se encontraron diferencias en la ejecución de los clientes que realizan el monitoreo dependiendo de las distribuciones de Linux que tenía instalado en el servidor: Debian 7, Debian 8 y Centos 6.2.; por lo que fue necesario desarrollar un agente distinto para el cliente de Debian (7 y 8) y otro para Centos.

La arquitectura del SMGN es muy genérica, sencilla y escalable, lo que permite el monitoreo de cualquier servidor que ofrezca servicios similares, por lo que puede

extrapolarse su uso. Además la integración de nuevos módulos con otras funcionalidades es factible con una inversión mínima.

## **5. Conclusiones**

Nuestros resultados demuestran que el diseño y construcción del Sistema de Monitoreo y Generación de Notificaciones (SMGN) para servidores GNU/Linux, garantiza la disponibilidad de servicios que soportan el Sistema de Gestión Digital (SGD) de manera semi-automatizada al implementarlo con agentes reactivos. Los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que durante las pruebas se obtuvieron mejores tiempos de respuesta al atender las fallas antes de que el usuario se percate de que el servicio no está activo.

El desarrollo de la arquitectura del SMGN y su implementación, brindan al administrador de los servidores, un mecanismo eficaz para un monitoreo básico de servicios sin la necesidad de estar observando continuamente lo que ocurre en los servidores. Lo anterior le permite dedicar tiempo a otras actividades y estar informado en caso de que se presente algún error inesperado.

Como trabajo futuro se espera integrar módulos que realicen las notificaciones hacia dispositivos móviles, así como componentes que automaticen de manera integral la atención a fallas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] R. Silva, E. Cruz, I. Méndez, J. A. Hernández, "Sistema de Gestión Digital para mejorar los procesos administrativos de Instituciones de Educación Superior: Caso de estudio en la Universidad Autónoma Metropolitana". *Perspectiva Educativa*, Vol.52. N°2. 2013. Pp.104-134.
- [2] J. L. Muñoz, D. Rodríguez-Gómez, A. Barrera-Corominas, "Herramientas para la mejora de las organizaciones educativas y su relación con el entorno". *Perspectiva educativa*. Vol. 52. N° 1. 2013. Pp. 97-123.
- [3] A. Chase, N.J. Aquilano, Dirección y Administración de la Producción y de las Operaciones. Sexta Edición. 1995. Editorial Irwin. México.

- [4] A. Villela, "Gestión en Educación Superior: Funciones, capacidades y necesidades directivas". *Revista Akademeia*. Vol. 2. N° 1. 2011.
- [5] La educación y la sociedad del conocimiento y de la información. [http://www.pedagogica.edu.co/storage/rce/articulos/rce36-37\\_09controv.pdf](http://www.pedagogica.edu.co/storage/rce/articulos/rce36-37_09controv.pdf). Febrero 2016.
- [6] I. Álvarez, E. Iturbe, *Los estudios de caso como estrategia para la formación en gestión*. 2005. Ed. Taller Abierto. México.
- [7] OpenView. <http://searchdatacenter.techtarget.com/definition/HP-OpenView>. Abril 2016.
- [8] PRTG Network Monitor. <https://www.es.paessler.com/prtg>. Abril 2016.
- [9] Nagios. <https://www.nagios.org/>. Abril 2016.
- [10] Logstash. <https://www.elastic.co/products/logstash>. Abril 2016.
- [11] Kibana. <https://www.elastic.co/guide/kibana/en/kibana/current/index.html>. Abril 2016.
- [12] A. Manrique, *Sistematización de modelos de gestión educativa de los gobiernos regionales de San Martín, Arequipa y la Libertad*. 2011. Proyecto USAID/ PERU/SUMA. Lima, Perú.
- [13] GNU/Linux. <http://www.gnu.org/gnu/linux-and-gnu.es.html>. Abril 2016.
- [14] TOGAF. <http://pubs.opengroup.org/architecture/togaf9-doc/arch/>. Abril 2016.
- [15] SNMP. <https://tools.ietf.org/html/rfc3413>. Abril 2016.
- [16] M. Wooldridge, N.R. Jennings, and D. Kinny, *The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design*, *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, vol.15. 2000.
- [17] F. Zambonelly, M. Wooldridge, N.R. Jennings, "Organisational Rules as an Abstraction for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems". *International Journal of Software Engineering and knowledge Engineering*. 2000.
- [18] SCRUM. [https://www.google.com.mx/#q=SCRUM&gws\\_rd=cr](https://www.google.com.mx/#q=SCRUM&gws_rd=cr). Abril 2016.
- [19] J. Cruz, A. I. Hernández, A. Beuchée, S. Wong, G. Passariello, F. Mora, G. Carrault, "Sistema Multiagentes para el Monitoreo Inteligente". *V Latin*

- American Congress on Biomedical Engineering 2007, Bioengineering Solutions for Latin America Health. Springer. Vol.18. 2007. Pp. 501-505.
- [20] M. Bravo, J. Velazquez, "Measurng Heterogeneity between Web-Based Agent Communication Protocols". On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2008 Workshops. Vol. 5333. 2008. Pp. 656-665.
- [21] A. F. Moreira, R. Vieira, R.H. Bordini, "Extending the Operational Semantics of a BDI Agent-Oriented Programming Language for Introducing Speech-Act Based Communication". Declarative Agent Languages and Technologies. Vol. 2990. 2004. Pp. 135-154.
- [22] A. De la Hoz Manotas, "Diseño de un sistema multi-agente para monitoreo de redes utilizando JADE y JPCAP". INGE CUC. Vol. 6. N° 1. 2010. Pp. 227-236.

## **7. Autores**

Dra. Rafaela Blanca Silva López es Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, Ingeniero en Electrónica, concluyó la Maestría en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Concluyo sus estudios de Doctorado en Sistemas y Ambientes Educativos en la Universidad de Guadalajara UDGVirtual en 2016.

Ing. Viridiana Matías Hernández, egresada de la carrera de Ingeniería en Computación por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco con área de concentración de Seguridad y Redes de Computadoras. Desarrolladora de sistemas y aplicaciones web, actualmente laboro en el área de middleware en AT&T.

Ing. Israel Isaac Montes de Oca Solis, egresado de la carrera en Ingeniería en Computación por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco con área de concentración de Seguridad y Redes de Computadoras.

M.C. Hugo Pablo Leyva es Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco. Obtuvo su título de Maestría en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco.

# MODELO COMPUTACIONAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN EL CULTIVO DEL PEZ BLANCO

***Midory Esmeralda Viguera Velázquez***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*midory.viguera@gmail.com*

***José Juan Carbajal Hernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*jcarbajalh@cic.ipn.mx*

***Luis Pastor Sánchez Fernández***

Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación  
*lsanchez@cic.ipn.mx*

***Margarita Hernández Martínez***

Centro Regional de Investigación Pesquera, Instituto Nacional de Pesca  
*margarita.hmartinez@inapesca.gob.mx*

## **Resumen**

Actualmente el cultivo de especies acuícolas para consumo humano es una práctica que se realiza en todo el mundo. La evaluación de la calidad del agua es un procedimiento indispensable, debido a que un adecuado control de la misma permite mayores tasas de crecimiento y producción. En el presente trabajo se hace un estudio sobre el pez blanco (*Chirostoma estor*), el cual es una especie cuyas poblaciones naturales se encuentran en deterioro debido a la sobrepesca y alteración de su hábitat. Se localiza, en el lago de Pátzcuaro, ubicado en Michoacán, México. Asimismo, se propone un nuevo modelo basado en prioridades para la evaluación de la calidad del agua en sistemas de cultivos de pez blanco, estableciendo una alternativa para preservar esta importante especie a través del mejoramiento de las condiciones para su cultivo. Los parámetros

ambientales se clasifican por su impacto ecológico negativo en el hábitat basado en las concentraciones de los contaminantes registrados.

**Palabra(s) Clave(s):** Acuicultura, calidad del agua, *Chirostoma estor*, procesamiento de señales.

## 1. Introducción

El pez blanco es una importante especie endémica que habita en el Lago de Pátzcuaro, ubicado en Michoacán, México [1]. Esta especie tiene un alto valor cultural, ecológico y económico ya que es un pez muy importante en la gastronomía de esta zona que es altamente turística. Actualmente, esta especie se encuentra en peligro de extinción y los esfuerzos para su conservación se han centrado en su cultivo en sistemas de acuicultura intensiva para fines comerciales, y evitar así la sobreexplotación de este recurso en su ambiente natural.

El ecosistema del Lago de Pátzcuaro en donde habita el pez blanco, se ha deteriorado por diversos problemas como la tala excesiva, la pesca desmedida y la contaminación del suministro de agua por diferentes efluentes [2], [3]. La mala calidad del agua causa mortalidad, enfermedad, crecimiento lento y baja reproducción de pez blanco [4]. En este sentido, el monitoreo de la calidad del agua es una actividad importante para la toma de decisiones ya que el disponer de esta información en forma rápida y oportuna nos permitirá evitar posibles problemas de mortalidad y estrés en el organismo [5].

En la actualidad, métodos eficientes para la evaluación de la calidad del agua son necesarios para el establecimiento de mecanismos capaces de gestionar la concentración de contaminantes, evitando el estrés y muerte en los organismos sensibles, como es el caso de esta especie sumamente nerviosa y frágil que es muy susceptible a cambios en el ambiente.

La necesidad de técnicas apropiadas en este campo es claramente notable, como aquellos estudios de los parámetros ambientales en la gestión del agua, proporcionando una interpretación completa de cada parámetro. Algunas metodologías para la evaluación y seguimiento de los contaminantes del agua han sido aplicadas por organizaciones internacionales como la Fundación Nacional de

Saneamiento en EE.UU. [6], el Ministerio del Consejo Canadiense del Medio Ambiente [7], y la SEMARNAT en México [8]. Estas instituciones se han encargado del desarrollo de algunas metodologías para la evaluación de la calidad del agua en diferentes escenarios. La mayoría de ellos han sido realizados por la normalización de los parámetros de acuerdo con alguna interpretación de buenas o malas concentraciones contaminantes.

En 1970, Brown, McClelland, Deininger y Tozer, apoyados por la National Sanitation Foundation de los Estados Unidos de Norteamérica, proponen un índice conocido como Índice de Calidad de Agua de la NSF (NSWKI) [6] [9]. Este índice es el más empleado en la valoración de la calidad de las aguas superficiales para consumo humano a nivel mundial. Otro modelo orientado para el consumo humano es propuesto por Dinius (1972). Este trabajo también se le utiliza para diferentes fines como son la agricultura, pesca e industria [10]

Por otro lado, en [11] la Autoridad Ambiental del Estado de Sao Paulo, Brasil (CETESB) realizó una adaptación para ríos tropicales utilizando el índice propuesto por la Nacional Sanitation Foundation (NSF), el cual se desarrolló mediante consulta de expertos en el tema y teniendo como determinante la utilización para abastecimiento público. En [12] se ha desarrollado un índice de la calidad del agua para la evaluación de agua potable (Scatterscore index), que se utiliza en los Estados Unidos de América. Un Índice de Calidad del Agua de Ríos [13], se utiliza para evaluar la contaminación multiplicando una función de agregación de valores estandarizados y mediante el uso de un conjunto de parámetros del agua. En [14], un Índice de Calidad del Agua para la Vida de agua dulce, ha propuesto la clasificación de parámetros de calidad del agua en los cuerpos de agua en Canadá. Como se puede observar, el índice NFS puede ser adaptado y modificado parcialmente acuerde a los parámetros involucrados en la medición de cada sistema acuático en particular. No obstante, aunque estos modelos han sido desarrollados para la evaluación de agua dulce, resultan incompatibles para la evaluación del cultivo del pez blanco, ya que se desconoce gran parte de los parámetros ambientales para el óptimo crecimiento y reproducción en sistemas controlados.



Como se mencionó anteriormente, los modelos para la evaluación de la calidad del agua están orientados al agua dulce, salada y potable. Sin embargo, la necesidad de desarrollar nuevos modelos para la evaluación de los sistemas de cultivos de pez blanco es una tarea importante con el fin de preservar esta importante especie que cada día es más escasa en su ambiente natural.

Por esta razón, este trabajo propone el desarrollo de un modelo computacional para la evaluación de la calidad del agua de cultivos del pez blanco, empleando un análisis de pesos los cuales están directamente relacionados con la importancia que tienen los parámetros medioambientales en el desarrollo del pez. Como resultado, se espera un descenso en las tasas de mortalidad y la reducción de niveles de estrés en el organismo, para así obtener sistemas de cultivo más sanos y productivos.

El resto del presente trabajo se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2 hace referencia a los conceptos fundamentales para el entendimiento de la calidad del agua en sistemas acuícolas. El capítulo 3 explica el modelo computacional desarrollado para la medición y análisis de los parámetros ambientales para la evaluación de la calidad del agua. El capítulo 4 muestra los resultados experimentales obtenidos de mediciones reales empleando el modelo propuesto. Finalmente, el capítulo 5, expone las conclusiones de este trabajo.

## **2. Requerimientos de la calidad del agua**

### **Ecosistema del *Chirostoma estor***

Lago de Pátzcuaro se encuentra en la parte oeste de la meseta volcánica central de México, a unos 50 km al este-sureste de Morelia (figura 1) [15]. Es uno de los más grandes e importantes lagos naturales por sus actividades económicas, pesqueras, ecológicas, históricas, sociales y culturales.

En este hábitat existen diversas especies endémicas como el pez blanco (*Chirostoma estor*), charal prieto (*C. attenuatum*), *C. grandocule* (*C. patzcuaro*) el acúmara (*Algansea lacustris*), la chegua (*Allophorus robustus*), el tiro (*Goodea atripinnis*) y una especie de ajolote (*Ambystoma dumerilii*), entre otros.

El pez blanco (*Chirostoma estor*) representa la principal fuente de ingresos y de

empleo debido a que la gente de esta región depende casi exclusivamente de la pesca, por esta razón se encuentra en peligro de extinción, aunado al deterioro del ambiente y a la alta demanda en el mercado local y regional [1]. Se debe sumar a esto, la contaminación del lago debido a la descarga de agroquímicos, aguas residuales de origen doméstico, eutrofización, asolvamiento, la deforestación y la erosión de los bosques que lo rodean [16].



Figura 1 Ubicación del sitio de muestreo de datos en Pátzcuaro, Michoacán.

Teniendo en cuenta la importancia del pez blanco, organizaciones gubernamentales como la estación de Limnología de Pátzcuaro INAPESCA [8] y el IMTA [17], han llevado a cabo varios estudios sobre este problema, recalcando la necesidad de resolver los problemas ambientales que persisten en este lago. Vale la pena mencionar que el INAPESCA es el único instituto mexicano de investigación pesquera y acuícola con cobertura nacional, que entre sus atribuciones tiene el desarrollo de tecnologías para el cultivo de especies nativas.

### Requisitos medioambientales

La calidad del agua se basa en los resultados de las pruebas de toxicidad. Estas pruebas miden las respuestas de los organismos acuáticos a cantidades definidas de compuestos específicos [3], [18]. Cada especie acuática tiene

diferentes niveles de tolerancia de parámetros tóxicos; en el presente trabajo se analizan las características del *Chirostoma estor* (pez blanco).

En los sistemas de acuicultura extensiva e intensiva en México, los parámetros físico-químicos son monitoreados en diferentes frecuencias de acuerdo a las necesidades del sistema de cultivo [19]. Para el *Chirostoma estor*, el oxígeno disuelto, temperatura y pH son monitoreados diariamente debido a que representan los parámetros más críticos para esta especie y se utilizan como base para este trabajo. Los análisis semanales se realizan para los nitratos, turbidez y el amoníaco no ionizado, entre otros.

La mayoría de los organismos acuáticos se han adaptado a vivir en un estrecho intervalo de temperatura y mueren cuando la temperatura es demasiado baja o alta. La temperatura afecta su metabolismo, reproducción y crecimiento. Los contaminantes se vuelven más tóxicos a temperaturas más altas [20]. El pH es la medida de los iones de hidrógeno en el agua: hidrógeno e iones hidroxilo. Cuando hay un número igual de ambos, el pH es neutro. Cuando los iones de hidrógeno aumentan, el agua se vuelve más ácida; Por el contrario, cuando los iones hidroxilo incrementan, el agua se convierte en básica. La mayoría de los organismos acuáticos tienen un estrecho margen de tolerancia de pH, en este caso es de 6.5 a 8.5 unidades [21].

Por último, el oxígeno disuelto (DO) es uno de los parámetros más importantes, porque la mayoría de los organismos acuáticos lo necesitan para sobrevivir. El oxígeno disuelto entra en el agua a través de la lluvia, la turbulencia, el viento y por las plantas acuáticas fotosíntesis. Las aguas con concentraciones de oxígeno disuelto alto generan los ecosistemas con mayor estabilidad [22].

Los parámetros físico-químicos suelen tener comportamientos muy inestables o de constante cambio. La combinación entre parámetros fuera de sus niveles óptimos puede desestabilizar el ecosistema. Es importante definir los niveles mínimos y máximos permitidos para cada uno de ellos. Asimismo, los valores óptimos para un parámetro ambiental pueden definirse dentro de un rango de medición; valores fuera de éste puede representar problemas en la calidad del agua (tabla 1).

Tabla 1 Rangos definidos para buen manejo de calidad del agua en estanques de cultivo.

Parámetros	RANGOS		
	Bajo	Normal	Alto
Temperatura (°C)	0 – 15	15 - 24	24 - ∞
Oxígeno disuelto (ppm.)	0 – 4.5	4.5 - ∞	-----
pH	0 – 7	7 – 8.5	8.5 - 11

### Niveles de la calidad del agua

En este trabajo, el estado de la calidad del agua se ha categorizado en 4 diferentes niveles de evaluación, mismos que se describen a continuación:

- *Excelente*: Los parámetros físico-químicos se encuentran en los intervalos óptimos.
- *Buena*: Un parámetro arroja concentraciones fuera del rango óptimo; sin embargo, esta situación no es perjudicial para la especie por lo que la amenaza es mínima.
- *Regular*: Algunos parámetros reportan concentraciones fuera del rango óptimo, y la combinación entre ellos representa ciertos niveles de estrés en el pez blanco.
- *Mala*: La calidad del agua es peligrosa para el pez blanco. Las concentraciones de los parámetros están fuera de los intervalos óptimos o un parámetro crítico presenta concentraciones que podrían generar una situación de peligro potencial en la salud del pez incluso la muerte (Ej. concentraciones extremadamente bajas de oxígeno, concentraciones altas de pH, etc.).

### 3. Modelo basado en prioridades para la evaluación de la calidad del agua

En este trabajo, un modelo basado en pesos derivados de prioridades se utiliza con el fin de analizar la condición de la calidad del agua en los cuerpos de agua dulce, donde habita el pez blanco (*Chiostoma estor*). En este caso, nuestra hipótesis supone que los parámetros de calidad del agua pueden ser evaluados utilizando como referencia la contaminación o sus niveles óptimos, y así, calcular

una puntuación global mediante la agregación en un Índice de Calidad del Agua (ICA).

En la literatura, diferentes modelos para la calidad del agua se han desarrollado, sin embargo, solamente contemplan el uso de un límite en donde los contaminantes no excedan un nivel de concentración [23-27]. Por lo que en este trabajo se propone la modificación de dichos indicadores para la evaluación de niveles óptimos de medición, en donde los parámetros de la calidad de agua pueden tener definidos límites permitidos en altas o bajas concentraciones según sea el caso. Por lo tanto, el modelo propuesto se expresa de manera general mediante ecuación 1.

$$WQI = 1 - \gamma \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (1)$$

Donde  $WQI$  es el índice de la calidad del agua,  $n$  es el número de parámetros evaluados,  $\gamma$  es el factor de normalización,  $W_i$  es la ponderación (peso asignado) a cada variable incorporada, la cual corresponde a su repercusión en la capacidad del agua para sostener la vida acuática en los estanques de cultivo. Estos factores de ponderación se ajustaron con base en los pesos del ICA-NSF [6]: oxígeno disuelto (0.17), temperatura (0.1) y pH (0.11).  $I_i$  Es el índice de parámetro particular que se puede obtener para la temperatura y el pH con ecuación 2.

$$I_i = \left| \frac{C_i - m_i}{C_s - m_i} \right| \quad (2)$$

Donde  $C_i$  es la concentración del parámetro,  $C_s$  es el límite mínimo o máximo permitido del parámetro correspondiente (cualquiera de estos dos) y  $m_i$  es el punto medio del nivel permisible. Por citar un ejemplo, para el parámetro de temperatura ( $Temp$ ), el rango óptimo se encuentra entre 15 y 24 °C (tabla 1).  $C_i$  Será el valor arrojado por el medidor,  $C_s=24$  ó 15 y  $m_i= 19.5$ .

Como se mencionó anteriormente, el cálculo de  $I_i$  para el pH y la temperatura se obtiene mediante la ecuación 2, para el  $I_i$  del oxígeno disuelto se calcula con ecuación 3.

$$I_i = 1 - \frac{C_i}{C_s} \quad (3)$$

Se emplea una fórmula diferente, ya que en el oxígeno disuelto no se manejan rangos de *bajo*, *normal* y *alto*, éste solo se rige por *bajo* y *normal*, teniéndose un solo límite permitido y cuando la concentración es baja, el indicador tiende a evaluar negativamente. Por último, normalizamos los valores con ecuación 4.

$$Y = \frac{1}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (4)$$

El índice desarrollado tiene un rango que varía entre valores de [0 – 1], en donde 0 significa una mala calidad del agua y 1 una excelente evaluación. Los rangos intermedios de la calidad del agua *bueno* (0.334) y *regular* (0.634) se establecen dentro del mismo rango.

## 4. Resultados Experimentales

### Fuentes de datos

Con el fin de estimar el índice WQI este se llevó a cabo con datos reales, los conjuntos de datos de las mediciones ambientales se efectuaron a partir de las bases de datos de estanques intensivos controlados desde CRIP-INAPESCA en Pátzcuaro. El conjunto de datos del medio ambiente se compone de 2318 registros (temperatura, oxígeno disuelto y pH) con un periodo de 1 hora entre las mediciones; lo que hace un total de 24 mediciones diarias de monitoreo registrado, figuras 2, 3 y 4.

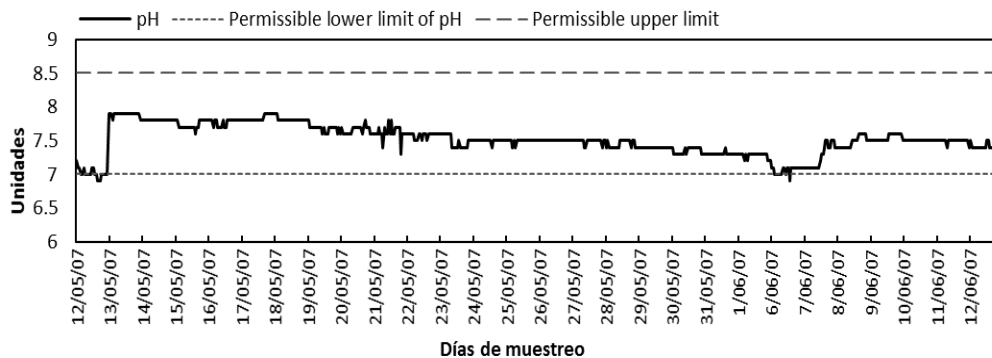


Figura 2 Medición unidades PH.

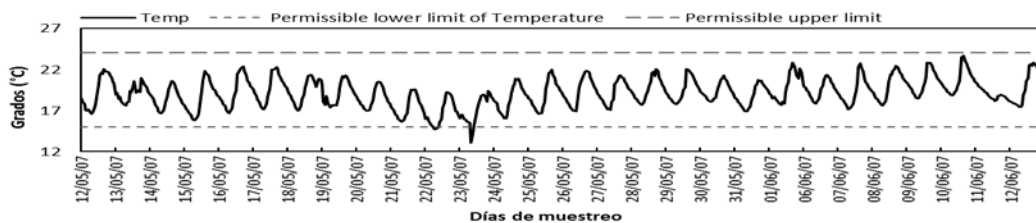


Figura 3 Medición temperatura.

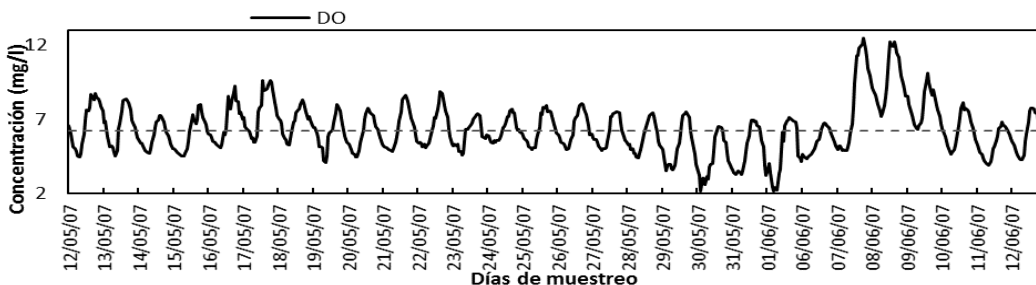


Figura 2 Medición concentración de oxígeno disuelto.

En las figuras 2, 3 y 4 se pueden observar las variaciones diarias. El oxígeno disuelto y temperatura muestran valores fuera de los niveles óptimos, mismos que afectarán directamente la evaluación del WQI.

### Evaluación de Parámetros

Para realizar un análisis eficiente de acuerdo con [28], el tamaño mínimo de la muestra que se usará se calcula mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{k^2 * p * q * N}{(e^2 * (N - 1)) + k^2 * p * q} \quad (5)$$

Donde N determina el tamaño de la población (9312), k es una constante que regula el nivel de confianza, donde un 99% se calcula con una  $k = 2,58$ ; e define el margen de error (5%) y para la designación de la diversidad del universo, la heterogeneidad ( $p = q = 0,5$ ). En este caso, se requieren 621 muestras; sin embargo, un mes contiene 720 muestras, por lo que el análisis del mismo es suficiente para cumplir este requisito.

En la figura 2, se observan bajas variaciones diarias en el pH, donde el parámetro presenta mayormente concentraciones dentro del nivel óptimo. En las figuras 3 y

4, se muestran las variaciones diarias de temperatura y oxígeno disuelto. En este caso, los valores de ambos parámetros caen dentro y fuera de los niveles óptimos, lo cual afectará la evaluación del estado de la calidad del agua.

En este caso, el pH no representa problemas para la calidad del agua en contraste con el oxígeno disuelto. Las temperaturas diarias tenían grandes variaciones que dependen de la cobertura de nubes, el viento y la radiación solar.

El oxígeno disuelto mostró un comportamiento similar al de la temperatura debido al efecto de la radiación solar, cuando ésta aumenta, la actividad de las algas genera altas concentraciones de oxígeno disuelto. Cuando la radiación solar disminuye, una reducción de temperatura está presente en los estanques y un efecto de demanda de oxígeno es generado por las algas y el consumo organismo. Así, el oxígeno disuelto podría caer por debajo 3 o 4 mg / l, lo que representa una situación perjudicial para los organismos.

### Evaluaciones de la calidad del agua

Una serie de pruebas experimentales se proponen empleando el conjunto datos previamente adquirido. Se puede observar (figura 5) los índices obtenidos según la NFS y el modelo propuesto, se puede percibir que ambos siguen un comportamiento similar, debido a que los factores de ponderación empleados en el modelo propuesto (WQI) se ajustaron con base en los pesos del ICA-NSF.

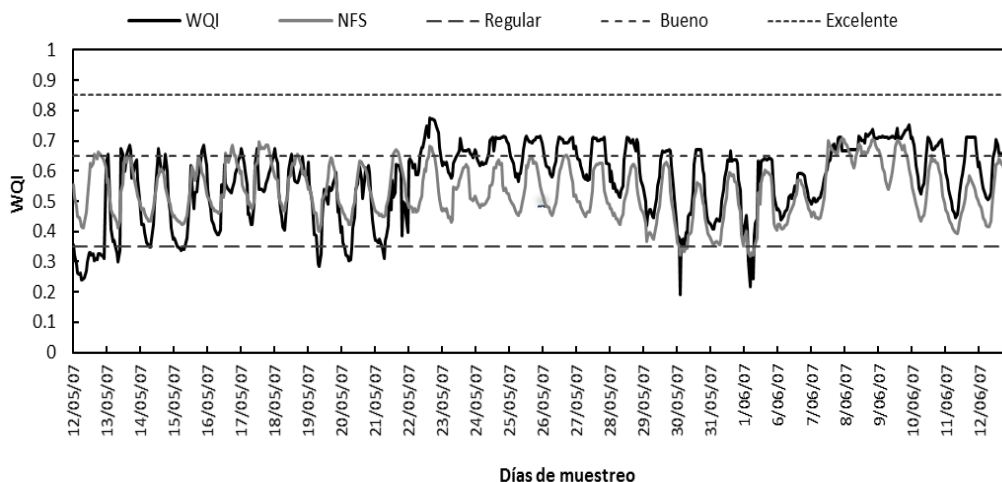


Figura 5 Comparación índices de calidad del agua en estanques de cultivo del pez blanco.



Enfocándonos en WQI podemos notar que los resultados presentes, muestran mediciones que fluctúan entre los estados *regular* y *bueno*. Estas variaciones son principalmente generadas por el oxígeno disuelto que en este caso, resultó ser la variable con el mayor peso asignado según la NSF [6]. En segundo lugar, se encuentra la temperatura que, al variar durante el día, afecta de la misma forma el índice de la calidad del agua. El pH se mantiene más estable por lo general, sin desestabilizar el ecosistema considerablemente. Debido a este comportamiento, se le asignó un peso menor. Se puede observar que en general la calidad del agua se sostuvo en un nivel aceptable, sin embargo, si los parámetros medioambientales pudieran controlarse de mejor forma, generaría estados más propicios para un buen crecimiento del pez blanco. La figura 6 muestra la interfaz de usuario desarrollada para realizar las evaluaciones de la calidad del agua. Finalmente, el indicador propuesto muestra mediciones más ajustadas al cultivo de pez blanco, toda vez que el NSF fue diseñado para analizar cuerpos de agua dulce en general (ríos, lagos, agua potable, etc.) y el WQI propuesto fue diseñado y ajustado a los requerimientos de cultivo del pez blanco, así como para la detección de posibles anomalías generadas por estados no deseados de la calidad del agua en el sistema de cultivo.

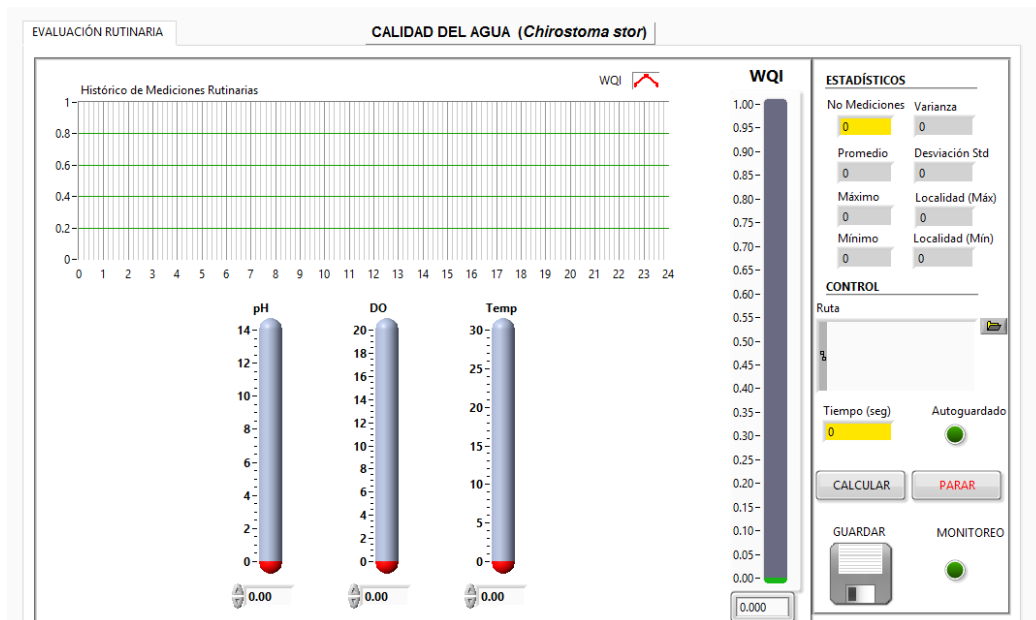


Figura 6 Interfaz gráfica para el cálculo de la calidad del agua en estanques del CRIP.

## 5. Conclusiones

En este trabajo, un nuevo modelo computacional basado en prioridades para el cálculo del índice de calidad del agua se ha propuesto como una forma de evaluar los parámetros más importantes de calidad de agua, oxígeno disuelto, pH y temperatura. Dichas prioridades representan la interacción de los parámetros medioambientales con el hábitat de producción del pez blanco. Asimismo, este modelo fue creado de acuerdo a los requerimientos de calidad el agua del pez blanco implementadas en CRIP, Pátzcuaro. El modelo desarrollado proporcionó una completa integración de todas las evaluaciones particulares en el ecosistema proporcionando un indicador global del buen o mal estado de la calidad del agua en la acuicultura de la especie. Los resultados experimentales obtenidos mostraron un buen desempeño en las evaluaciones de la calidad del agua, proporcionando una herramienta confiable en la toma de decisiones para el manejo del agua. Este sistema se propone como una herramienta de gran ayuda a la comunidad acuícola que estudia el ecosistema del pez blanco como una manera de preservar esta importante especie. El WQI propuesto puede aplicarse a organismos similares mediante el ajuste de los parámetros de límite óptimos, siempre y cuando las condiciones del ecosistema sean muy similares. Es importante remarcar, que aunque el sistema representa una plataforma tecnológica de alta especialidad para el área destinada, existen mejoras que se pueden ser planeadas como un trabajo futuro, tales como analizara e integrar al sistema otros parámetros medioambientales que pudieran ser fundamentales en el estudio del pez blanco.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] C. Rojas, "El pez blanco". Revista Digital Universitaria, INAPESCA. Vol. 6. Num. 8. 2005.
- [2] C. Boyd, Whitefish pond effluents: observations of the nature of the problem on commercial farms, Proceedings of the Special Session on Whitefish Farming, World Aquaculture Society, USA. 1992.

- [3] Y. Chien, Water quality requirements and management for marine Whitefish culture. Proceedings of the Special Session on Whitefish Farming. World Aquaculture Society, USA. 1992. Pp. 144 – 156,
- [4] J. Cohen, T. Samocha, J. Fox, “Characterization of water quality factors during intensive raceway production of juvenile *Litopenaeus vannamei* using limited discharge and biosecure management tools”. *Aquacultural Engineering*, Elsevier. Vol. 32. 2005. Pp. 425–442.
- [5] H. Kenneth, Water Quality Prediction and Probability Network Models. 1999. North Carolina State University. Pp.87-105,
- [6] [NSF] National Sanitation Foundation International. <http://www.nsf.org>. August 2007.
- [7] CCME] Canadian Council of Ministers of the Environment (Canada). <http://www.ec.gc.ca/soer-ree/N>. August 2007].
- [8] [SEMARNAP], Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. 2006. NOM-001-ECOL-1996.
- [9] M. Castro, J. Almada, J. Ferrer, D. Díaz, “Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global”. *Ingeniería Solidaria*. Vol. 10. N.º 17. Dic. 2014. Pp. 111-124.
- [10] N. Samboni, E. Y. Carvajal, J. Escobar, “Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua (A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators)”. *Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia*. Vol. 27. No.3. Pp. 172-181.
- [11] Portal Regional para la Transferencia de Tecnología y la acción frente al cambio climático en América Latina y el Caribe. <http://www.cambioclimatico-regatta.org/index.php/es/>.
- [12] Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis Report Prepared and published by the United Nations Environment Programme Global Environment Monitoring System (GEMS)/Water Programme. 2007.

- [13] Department of Ecology State of Washington, River and Stream Water Quality Index, Quality Management Plan. 2010.
- [14] Environment and climate change Canada, Freshwater Quality in Canadian Rivers, 2015.
- [15] P. Bradbury, "Limnologic history of Lago de Patzcuaro, Michoacan". Mexico for the past 48,000 years: impacts of climate and man, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. Volume 163. Issues 1. 2000. Pp. 69–95.
- [16] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.imta.gob.mx/quienessomos>.
- [17] O. Páez, Camaronicultura y Medio Ambiente. Instituto de Ciencias del mar y Limnología. 2001. UNAM. México. Pp. 271-298.
- [18] W. Ocampo, N. Ferré, J. Domingo, M. Schuhmacher, "Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study". Environment International. Vol 32. Elsevier. 2006. Pp. 733-742.
- [19] M. M. Carro, J. I. Dávila, A. G. Balandra, R. H. López, R. H. Delgadillo, J. S. Chávez, L. B. Inclán. "Importance of diffuse pollution control in the Patzcuaro Lake Basin in Mexico". Water Science and Technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research. 2008.
- [20] M. Banna, H. Najjaran, R. Sadiq, S. Imrah, M. Rodriguez, M. Hoorfar, "Miniaturized water quality monitoring pH and conductivity sensors, Sensors and Actuators" B: chemical. Vol 193. 2014. Pp. 434-441
- [21] R. Bailey, M. Ahmadi, "Spatial and temporal variability of in-stream water quality parametre influence on dissolved oxygen and nitrate within a regional stream network". Ecological Modelling. Vol.277. 2014. Pp. 87-89.
- [22] L. Gomes, D. Antunes, M. Rui, D. Oliveira, "Hydrodynamics and water quality modelling in a regulated river segment: application on the instream flow definition". Ecological Modelling. Volume 173. Issues 2–3. 2004. Pp. 197–218.
- [23] G. Sallam, E. Elsayed, Estimating relations between temperature, relative humidity as independed variables and selected water quality parametres in Lake Manzala, Egypt, Ain Shams Engineering Journal. 2015.

- [24] N. Giljanovic, "Water quality evaluation by index in Dalmatia". *Water Research*. Vol. 33. No. 16. 1999. Pp. 3423–3440.
- [25] B. Prasad, J. Bose, "Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a lime stone mining area of the lower Himalayas". *Environmental Geology*. Vol. 41. 2001. Pp. 183–188.
- [26] A. Bardalo, W. Nilsumranchit, & K. Chalermwat, "Water quality and uses of the Bangpakong river". Eastern Thailand. *Water Research*. Vol. 35. Issue 15. 2001. 3635–3642.
- [27] A. Martínez, J. Muñoz, A. Pascual, *Tamaño de muestra y precisión estadística*, Ciencia y Tecnología. 2004. Universidad de Almería.

## 7. Autores

Ing. Midory Esmeralda Viguera Velázquez es alumna egresada de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas. Actualmente es estudiante de la maestría Ciencias de la Computación del Centro de Investigación en Computación – IPN, México. Sus líneas de interés son: Programación, Lógica Difusa y Redes Neuronales.

Dr. José Juan Carbajal Hernández es egresado del Doctorado en Ciencias de la Computación del Centro de Investigación en Computación – IPN, México en 2011. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACyT, México. Sus actuales líneas de interés incluyen Electrónica, Instrumentación Analógica y virtual, Reconocimiento de Patrones, Lógica Difusa y Redes Neuronales.

M.C. Margarita Hernández Martínez, es egresada de la licenciatura y la maestría de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es investigadora Titular C, y responsable del Laboratorio de Acuicultura en el Centro Regional de Investigación Pesquera del Instituto Nacional de Pesca. Actualmente se desempeña en el desarrollo tecnológico de especies nativas del Lago de Pátzcuaro, así como en el área de sanidad acuícola en cultivos de peces marinos.

Dr. Luis Pastor Sánchez-Fernández realizó su doctorado en Ciencias Técnicas por

el Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría" de la Habana, Cuba (1998). Profesor-Investigador del Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional, México, DF. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México. Sus intereses de investigación incluyen: Instrumentación virtual, Medición y Procesamiento Inteligente de Variables Físicas, Reconocimiento de Patrones, Medición y Sistemas de Control.

Los autores del presente trabajo agradecen a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional bajo el apoyo del Estímulo Institucional de Formación de Investigadores derivado del proyecto no. 20150690 y 20160880.

# **BASIC APPLICATION OF EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR CIRCUIT DESIGNING**

***Ricardo Francisco Martínez González***

Instituto Tecnológico de Veracruz  
*imag@itver.edu.mx*

***Marcos Alonso Méndez Gamboa***

Instituto Tecnológico de Veracruz  
*lmarcosalonso@itver.edu.mx*

***José Luis Fernando Palomeque Loyo***

Instituto Tecnológico de Veracruz  
*jfpl@hotmail.com*

## **Abstract**

The evolutionary algorithms are a mixture of techniques based on natural process; they are vast and varied as the same nature. However, there are some invariant elements in each algorithm: initial population creation, selection, reproduction, and the current work cover all of them. At first, the evolutionary algorithm can be considered complicated or confusing; although, the current work shows that this kind of algorithms are simple once the principles are understood. The proposed application for the developed algorithm is the solution of an electric circuit; even though, it is quite simple, since it only has resistances and voltage source, it can show the applicability of the evolutionary algorithm at the search of solutions, no matter the problem origin.

**Index Terms:** Auxiliary mutation, evolutionary algorithms, mitosis based reproduction, passive circuit.

## **1. Introduction**

The evolutionary algorithms offer interesting and practical solutions for

engineering problems. They are based on heuristic search assumptions; the first researcher who proposed them was Holland [1].

Opposite to other optimization or searching methods, the evolutionary algorithms examine a set of probable solutions at the same time [2]. They emulate biological processes that are commonly implemented by nature. A flowchart appears in [3], it is an evolutionary algorithm; it has 4 stages or phases. At the first phase, the first population is initiated; and then, each individual is randomly varied [4].

Afterward, the varied individuals are evaluated to determinate its fitness; the evaluation is used to select the fittest individuals of the population. To close the loop, the fittest individuals are used for breeding a new generation. The loop is repeated until generate one or more individuals whose characteristics solve the initially proposed problem [5-6].

Pseudo random number generators are usually used to give origin the first generation. Those generators use different method to produce each number; ideally, the statistical distribution of the random generated numbers is uniform and it covers the whole available universe.

Other of the evolutionary operators is the reproduction; for it, there are basically two ways: Mitosis and Meiosis [7]. At mitosis, the same genetic information from an individual is copied to the next one. On the other hand, meiosis process consists in to divide by 2 genetic information of the selected individual. Such information is mated with another's one to breed a completely new individual.

Even thought, the natural selection looks fittest individuals; there are other artificial selection mechanisms as: Random, Roulette wheel, Rank, Tournament and Boltzmann. Each of the selection mechanisms has their pros and cons, in order to found more related information, see [3].

## **Review works**

The idea for designing analog circuits is not new; Fernandez et al [8], at 1991, stand for a useful form for automatic designing after a symbolic representation of the circuit. Nowadays, the usage for genetic algorithms in analog designing continues; Madeleine Fort at August 2014 [9] proposed an algorithm for



determining topology as well as elements values in an analog circuit. Besides, the current manuscript goes for analog designing, the application for genetic algorithms in circuit designing transcends analog barriers, and they are also use for digital designing. Vijakumari et al [10] use them for digital designing optimization. This introduction was used to give a brief background to the evolutionary algorithm world. On next section, the proposed algorithm will be depicted.

## 2. Circuit to be resolved

In the electric circuit, there are two kinds of elements: pasive and active. The active elements empower the circuit, and the pasive ones consumes power. For the active elements, the most common ones are voltage and current sources. Meanwhile, resistance is the most common pasive element. The proposed circuit is integrated by a voltage independent source and resistances, as it is shown on figure 1.

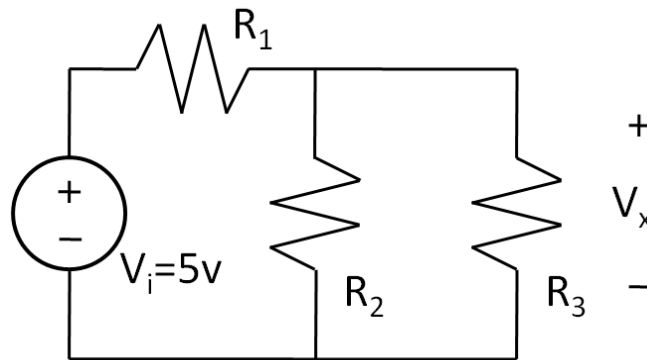


Figure 1 Test circuit for the current algorithm.

The circuit is analyzed by mesh method, since it has two clearly identified meshes. First mesh consists of  $V_i$ ,  $R_1$  and  $R_2$ ;  $R_2$  and  $R_3$  are part of second mesh. Voltage at  $R_3$  is the desired parameter for optimization.

Once the meshes were determined, each mesh is used to produce an equation; therefore, circuit produces two equations that are shown on next.

For first mesh, equations 1, 2, 3 y 4.

$$R_1 I_1 + R_2 (I_1 - I_2) - V_i = 0 \tag{1}$$

$$R_1 I_1 + R_2 I_1 - R_2 I_2 = V_i \tag{2}$$

$$R_2(I_2 - I_1) + R_2 I_2 = 0 \quad (3)$$

$$-R_2 I_1 + R_2 I_2 + R_2 I_2 = 0 \quad (4)$$

Integrating both equations into a whole system, it gives equation 5.

$$\begin{bmatrix} R_1 + R_2 & -R_2 \\ -R_2 & R_2 + R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

According to the figure 1, the evaluation parameter is the output voltage. It is determined as equation 6.

$$V_x = I_2 R_2 \quad (6)$$

The  $V_x$  value is set at 3.5 volts, the value was arbitrary and it does not have any meaning. Once the circuit conditions have been established, it is time for the proposed algorithm presentation.

### 3. Proposed Evolutionary Algorithm

Present work was inspired by the cellular reproduction known as mitosis. In this kind of reproduction, the original entity is copied to give origin other two new and independent entities. Those entities have the same characteristics as their parent entity; however and for the solution searching, each new entity must suffer a mutation. With it, any entity is a little different from the rest; no matter, if all of they were originated by the same parent entity.

As it was mentioned in the introductory section, a good part of algorithm success relies on initial population selection. As the proposed scheme was implemented in Matlab, initial population was generated using rand function. This function produces uniformly distributed sequences; such uniformity improves chances for solution finding.

Another parameter that drastically enhances algorithm chances is highly populated generation. The algorithm was firstly proved using 64 individuals for the first generation; afterward, the algorithm was modified to produce first generations with 216 individuals. The modification had good acceptance since the 64 individual generations sometimes do not converge in a correct solution, but the generations

with 216 individuals drastically improves its convergence.

After the initial generation was produced, it is evaluated. Each individual is used to solve the proposed circuit. For circuit solution, the matrix on equation 5 is solved using the Gauss Jordan elimination with partial pivoting method. This method is called in Matlab as `rref` function; the function output is taken to evaluate individual performance. Calculating its absolute error, the error is associated to specific individuals for future selection process.

With each evaluated individual, the complete generation is segmented in two. The more suitable half is used for reproduction and the less suitable one is disposed. Each individual at the more suitable half is used to generate two new individuals by the mitosis and mutation process previously described.

The newly generated population is evaluated once again and cycle is repeated until one individual has an absolute error lesser than a minimum allowed error. This allowed error is a parameter determined by user. Nevertheless, it is important to be cautious; the lower error is allowed, the more time the algorithm requires for solution finding. Another collateral effect of using a lower allowed error is an increment of the non-satisfaction possibilities.

#### **4. Result for the proposed algorithm**

The first result to be considered is statistical distribution for initial generated chromosomes. To give origin to 216 individual in first generation, six individual chromosomes were needed; ideally, the statistical distribution for chromosomes must be uniform; however, the number of chromosomes is not large enough for appreciation of such distribution. The phenomenon is shown in figure 2.

Non-uniformity of distribution for the initial generation should be partially fixed if more individual are included in it. Unfortunately after generating an empirical initial population with forty individual chromosomes, the non-uniformity stills. If this behavior remains, the number of individual chromosomes does not matter. However, problem relays on the generating algorithm of pseudo random numbers. In order to establish the point, statistical distributions of 40 and 100 individual chromosomes generated by `rand` function are presented at figure 3.

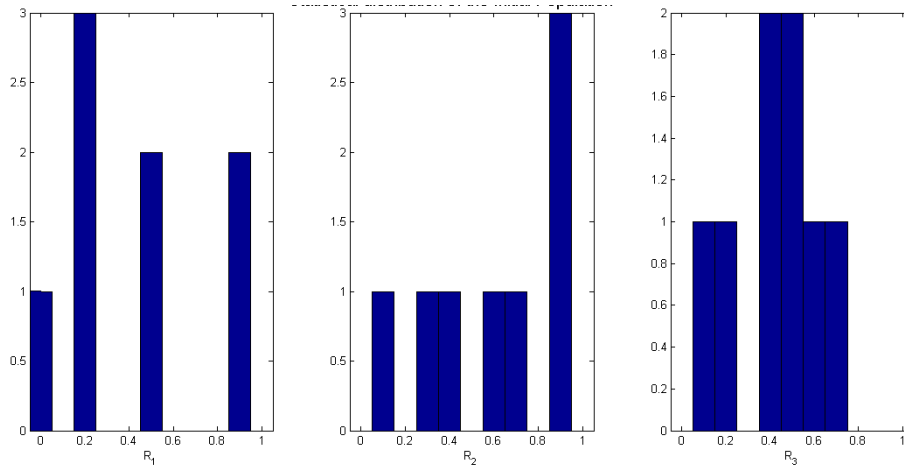


Figure 2 Statistical distribution for the firstly generated chromosomes.

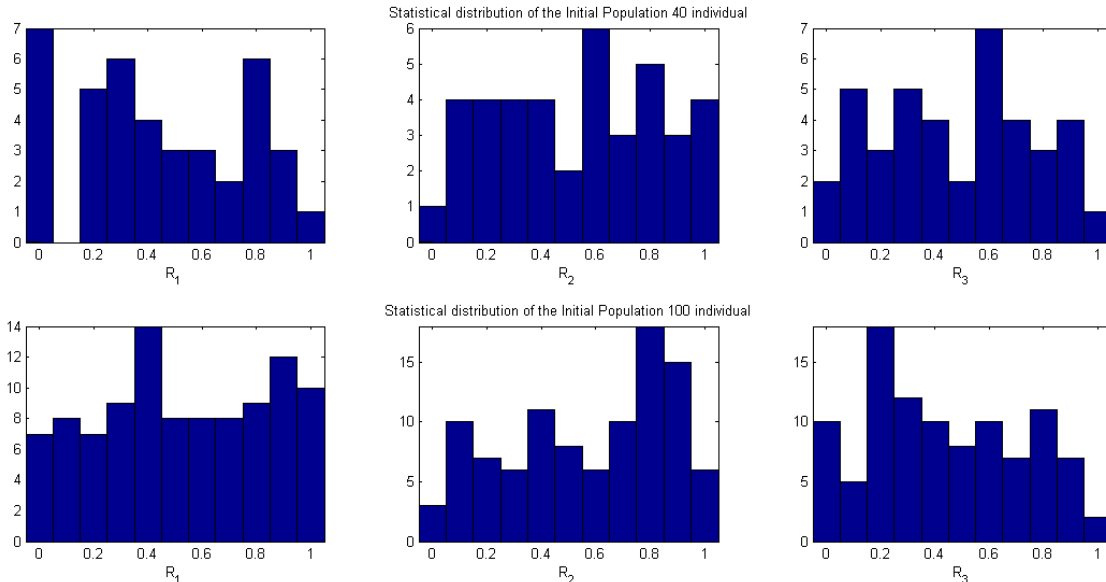


Figure 3 Statistical distribution of the initial chromosomes with different number, 40 chromosomes (top) and 100 chromosomes (bottom).

At first sight, distributions are not uniform. In consequence, if better initial chromosomes are required, non-uniformity phenomenon must be reduced; and the most obvious solution is to use a better generating algorithm, but the current work only uses rand function.

The initial population is established combining every individual chromosome up; in other words, one chromosome for  $R_1$  is put together with one for  $R_2$  and other one

for  $R_3$ . Process is repeated until have completely covered the chromosome pool of each resistance.

The next step for procedure is to measure fitness grade of recently made generation; for it, a deviation from desired value of output voltage is calculated. For calculation, absolute difference is determined following equation 7.

$$\varepsilon = |V_x^0 - V_x'| \quad (7)$$

Where  $\varepsilon$  is absolute error for the individual,  $V_x^0$  is the desired output voltage, and  $V_x'$  is output voltage obtained from tested individual.

Using equation 7 a graph was obtained. Such graph shows the absolute errors of each tested individual, and it gives evidence of how fitted the individual is. Additionally, the errors are ascending sorted; it eases selection process to give birth next generation. In figure 4, both graphs are presented; on left, the error graph as each individual gets so, and on right, the sorted errors graph.

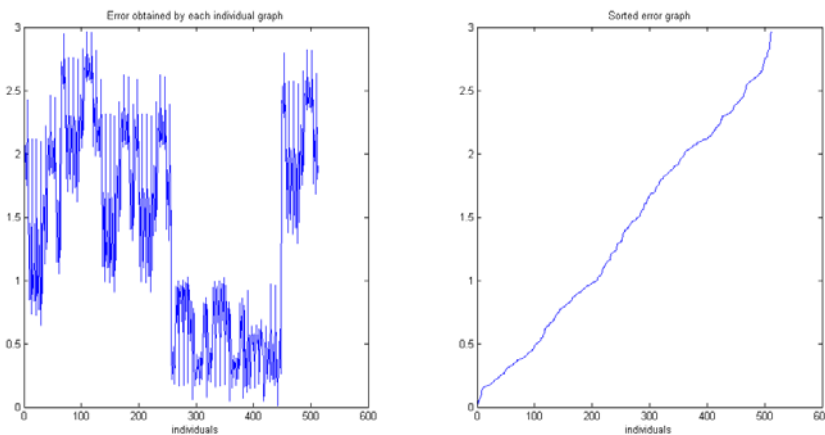


Figure 4 Errors obtained by each individual; (left) as they were obtained, (right) sorted.

The sorted errors drastically help selection process out, since only the fitter half of individuals is chosen for giving birth to next generation. As it was explained in the previous section, the reproduction recalls the mitosis reproduction. For this kind of reproduction, each individual of the fitter half is copied twice. In each copy, the genomes suffer a slight mutation produced by the function `rand` limited by a factor. The expression that was used for the copied and mutation process is

$$i'_{\frac{a-1}{2}+a} [R_1 + m_1, R_2 + m_2, R_3 + m_3] = i_a^0 [R_1, R_2, R_3] \quad (8)$$

Where  $i'$  is the individual that belongs to the fitter half of previous generation,  $i'$  is the new mutated individual,  $a$  is a consecutive number that starts at 1 and ends on half of the complete population;  $m$  is mutation value, it is determined by a random value multiplied by an elicited factor, and it is independently generated for each copying process.

The first generation is created from six values for each chromosome, resulting at 216 individuals. The second generation is the result of 108 individuals, each of them is mutated and copied twice; as consequence, now each chromosome has 216 values. This can result evident at see the figure 5, where the top histograms are for the first generation chromosomes and the bottom histograms are for the second generation ones.

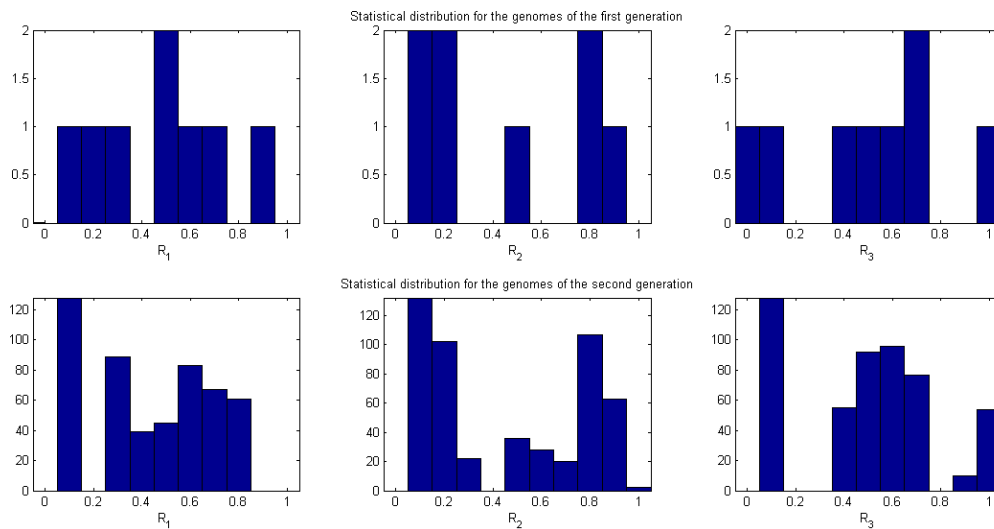


Figure 5 Histograms for the first (top) and second (bottom) generation genomes.

With the second generation created, the proposed process is iterated until reach the desired output; however, an exact output is extremely hard to achieve, so a safe parameter is established for saving malfunctions. For the current work, safe parameter was established at 0.1 volts.

Finally when any individual of population satisfies the output parameter, then iterating loop is broken up. The number of iterations depends on many factors as:

initial generation, desired output, safe parameters and mutation factor. Nonetheless, since this application is quite simple its convergence is soon, typically less than 10 iterations are required for finding a satisfying result. In each plot of figure 6 are shown the accumulative and minimum error respectively obtained by each generation. In those plots can be observed that the error decreases after every generation.

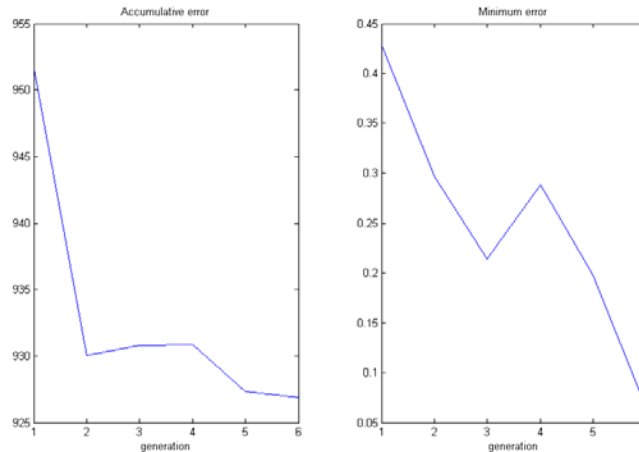


Figure 6 Accumulative (left) error plot and minimum (right) error plot obtained by each generation.

This results section was presented in order to review effectiveness of the proposed algorithm; now on next section, we will talk about the conclusions and knowledge let behind after this work

## 5. Conclusions

The proposed circuit and evolutionary algorithm are simple, and they were chosen in that way in order to have a closed milestone in this kind of algorithms. The knowledge after this first milestone is satisfactory, because it proves that evolutionary algorithm actually works for real circuit problem solutions and they do not have to be messy nor tricky.

Mitosis method can be used as reproduction mechanism; however, it necessarily requires a mutation process in order to achieve an individual who satisfies the required parameters.

## 6. Future work

With the good experience obtained from this work, next step is to rise evolutionary level up. In other words, enhance the proposed algorithm in order to satisfy multiple parameters. Other goal is to generate a more uniformly distributed population.

The final achievement is to stop Matlab need, and translate the algorithm to C or Python and use it as embedded part of a more sophisticated system.

## 7. Bibliography and References

- [1] J. H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. 1975. U. Michigan Press.
- [2] R. B. Goldberg, S. J. Barker, L. Perez-Grau, "Regulation of gene expression during plant embryogenesis". *Cell*. Vol. 56. Issue 2. 1989. 149-160.
- [3] S. N. Sivanandam, Deepa, *Introduction to genetic algorithms*. 2007. Springer Science & Business Media.
- [4] V. M. Kureichik, S. P. Malioukov, V. V. Kureichik, A. S. Malioukov, "Genetic algorithms for applied CAD problems". Springer Science & Business Media. Vol. 212. 2009.
- [5] J. Riget, J. S. Vesterstrøm, *A diversity-guided particle swarm optimizer-the ARPSO*. Dept. Comput. Sci., Univ. of Aarhus, Aarhus, Denmark, Tech. Rep. 2. 2002.
- [6] R. K. Ursem, *Diversity-guided evolutionary algorithms*. In *Parallel Problem Solving from Nature—PPSN VII*. Springer Berlin Heidelberg. 2002. Pp. 462-471.
- [7] C. L. Huskins, "Mitosis and meiosis". *Nature*. Vol. 132. 1933. Pp. 62-63.
- [8] F. V. Fernández, A. Rodríguez-Vázquez, J. L. Huertas, "Interactive AC modeling and characterization of analog circuits via symbolic analysis". *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. Vol. 1. Issue 3. 1991. Pp. 183-208.
- [9] M. Fort, *Genetic Algorithm Analog Circuit Design*. 2014.



- [10] C. K. Vijayakumari, P. Mythili, R. K. James, C. A. Kumar, "Genetic algorithm based design of combinational logic circuits using universal logic modules". *Procedia Computer Science*. Vol. 46. 2015. 1246-1253.

## **8. Authors**

Ricardo Francisco Martinez-Gonzalez. He was born on Veracruz, Mexico. He received his Bachelor of sciences degree from Instituto Tecnológico de Veracruz. Next on, He studied his M.Sc. degree at Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; where he also obtained his PhD degree; applying his knowledge on chaos applications. Nowadays, He works at Instituto Tecnológico de Veracruz.

Marcos Alonso Méndez Gamboa. He received his Bachelor of Science degree from Instituto Tecnológico de Veracruz at August 27, 2004. Afterwards, he studied his Master's Degree at Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), and he got it on February 29, 2008. He started working in Instituto Tecnológico de Veracruz at that year's summer.

José Luis Fernando Palomeque Loyo. He got his Bachelor of Science degree in Electronically Industrial Engineering from Instituto Tecnológico de Veracruz at 1982. At 2002, He got a Master's of Science degree in Science Teachings by CIIDET. He also had some remarkable chairs on Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos. Since 1987 He is professor of Electrics and Electronics Engineering Department at Instituto Tecnológico de Veracruz.

# **SIMULACIÓN DE FUEGOS ARTIFICIALES UTILIZANDO PYTHON**

***José David Alanís Urquieta***

Universidad Tecnológica de Puebla  
*david.alanis@utpuebla.edu.mx*

***Joel Vázquez Valencia***

Universidad Tecnológica de Puebla  
*david.alanis@utpuebla.edu.mx*

***Blanca Bermúdez Juárez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*bbj@solarium.cs.buap.mx*

***Marisol Calderón González***

Universidad Tecnológica de Huejotzingo  
*mariso\_l\_c@hotmail.com*

***María Luisa Morales Hernández***

Universidad Tecnológica de Huejotzingo  
*marialmor@hotmail.com*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la Visualización de Fuegos Artificiales mediante modelado basado en física usando python. La técnica de simulación con visualización del modelado basado en física toma un modelo físico de la realidad, en este caso el comportamiento de un fuego artificial cuando es lanzado al cielo, explota en el aire y se apaga. Estas dos partes se comportan de forma separada y son modeladas mediante ecuaciones diferenciales ordinarias. Estas ecuaciones se solucionan mediante el método de Euler. Para el caso del lanzamiento se calcula la trayectoria y la rapidez. Para el caso de la explosión se calculan las posiciones de las partículas de manera separada y a cierta altura aleatoria se aplica la fuerza

de gravedad y el sistema se recalcula. La instrumentación numérica se realizó mediante el lenguaje de programación Python, aprovechando las ventajas de la programación orientada a objetos e imperativa del lenguaje. Por último, se realiza la renderización de los resultados mediante PyOpenGL, como interfaz de programación de aplicaciones. Para este problema en particular la visualización resulta con un buen grado de realismo gracias a la estabilidad y nivel de convergencia del método numérico utilizado y la técnica de visualización presentada.

**Palabra(s) Clave(s):** Método de Euler, modelado basado en física, Python, PyOpenGL, simulación con visualización.

## 1. Introducción

Los fuegos artificiales son un conjunto de luces de colores y detonaciones producido por diferentes dispositivos de pólvora que se usan en fiestas públicas [10]. Existe otra acepción en el ámbito militar, sin embargo, este trabajo se centra en la primera definición. En México y en otros países se usan fuegos artificiales para amenizar las celebraciones públicas. El comportamiento de las luces artificiales produce una visualización colorida y vistosa [1].

Resultaría interesante el poder visualizar los fuegos artificiales sin necesidad de un gasto en pirotécnica o esperar a que exista un evento y captar las imágenes, todo esto para utilizarlo en animaciones, complementos de animación, videojuegos, entre otras. [4] [5].

Así se puede realizar una reducción de costos si se utiliza la simulación, ya que no implicaría gastar recursos en la obtención de las imágenes, o bien generando de alguna manera los efectos, además del tiempo y esfuerzo necesario para lograr el realismo deseado [4].

En este contexto las técnicas de simulación con visualización son una herramienta útil en la construcción de visualizaciones con costos razonables en tiempos relativamente cortos si se les compara con la ingeniería que se tenía que realizar anteriormente y sin tomar en cuenta técnicas paralelas o complementarias como la realidad aumentada, la realidad virtual, animación digital, entre otras. [5]. Se trata

pues de un área desarrollada sobre una base interdisciplinaria que ha ido creciendo, generando un aporte contundente en la producción de animaciones con realismo y que ahorran costos en tiempo, dinero y esfuerzo.

El Modelado Basado en Física, realizada por Baraff y Witkin [4] [5], es una de las técnicas de simulación con visualización, y nace como una respuesta a la necesidad de realismo en la visualización de materiales describiendo su comportamiento a través de las fuerzas físicas con las que se interactúan, tanto externas como internas, considerando la evolución del objeto a través de ciclos de los materiales y su desenvolvimiento con otros objetos [5].

Un área importante del modelado basado en física son los sistemas de partículas. Según Baraff and Witkin [4] se puede definir un sistema de partículas como objetos que tienen masa, posición y velocidad, además de que responden a fuerzas pero que no tienen una extensión espacial. Además, el comportamiento de las partículas es colectivo, es decir, se conectan entre sí. En muchas producciones, sobre todo de películas, se utilizan los sistemas de partículas para visualizar agua, humo, cardumen y parvadas, entre otros muchos [4] [5].

Dado todo lo anterior, el comportamiento de los fuegos artificiales se puede modelar a través de un sistema de partículas.

Así el objetivo primordial de este trabajo es la simulación de los fuegos artificiales con visualización utilizando la técnica de modelado basado en física. La solución que se propone para lograr este cometido es utilizar un sistema de partículas y realizar su visualización.

Si bien es cierto que actualmente existen muchos softwares capaces de simular e incluso de programar sistemas de partículas con relativamente poco esfuerzo tales como Maya, Matlab, 3D Max, Blender, y un largo etcétera., estos softwares tienen una curva de aprendizaje alta, exigen muchos recursos computacionales y en otros casos no son software libre.

Además de lo anterior existen software realizados en el internet, como las que se aprecian en [11] y [12] entre otras muchas, sin embargo, estos softwares necesitan requerimientos especiales, y no es posible acceder al código para utilizarlo en otras aplicaciones con el fin de complementarlas, retomar alguna de

ellas o bien adaptarlas a procesos, animaciones o estudiarlas con los alumnos [4][1]. Las ventajas de realizar la simulación con visualización mediante Python y OpenGL ofrecen que el software pueda ser explorado, adaptado a las necesidades particulares, independientemente de que la licencia del software libre así lo solicite [4].

Aunado a lo anterior la implementación y el uso de este software es un medio por el cual se pueden explorar entre otras cosas: las distribuciones de los datos de manera aleatoria, añadir fuerzas adicionales, reutilizar el código y encontrar patrones de diseño adecuados para el comportamiento de otras simulaciones, etc. Por último pero no menos importante el uso de la programación imperativa y orientada a objetos explota las bondades de ambos paradigmas, por un lado la potencia, flexibilidad y seguridad del paradigma orientado a objetos, además de su funcionalidad, reutilización de clases y su potencial didáctico, por el otro la transparencia para realizar interfaces con otros lenguajes y bibliotecas gráficas. De esta forma se tiene un recurso didáctico interesante y una aplicación escalable con uso de pocos recursos de forma abierta y legible para los interesados.

### **Antecedentes**

El término sistemas de partículas fue desarrollado en computación gráfica desde la mitad del siglo XX. Se trata de una simulación de estilo Monte Carlo, donde los puntos son los que se comportan de una manera definida y simulan ciertos comportamientos, como una unidad u objeto definido más que como un conjunto de puntos. La definición de un sistema de partículas ha cobrado relevancia sobre todo en las producciones filmicas, como ya se mencionó debido al ahorro de costos que se tiene en la implementación, uso y reproducción, en contraste con la reproducción de estos sistemas en el mundo real [12] [13].

Una brevísima historia de los sistemas de partículas se remonta a 1962, en un popular juego de video denominado SpaceWar las naves explotaban convirtiéndose en nubes de pixeles, se considera este como el segundo en la historia. En 1978 existió otro juego denominado llamado Asteroid donde las naves explotaban convirtiéndose en líneas discontinuas [13].

Se considera un de los primeros casos de éxito y que se presenta en el artículo Particle Systems A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects donde se presenta el uso de un sistema de partículas en la super producción de Lucas Film Star Trek II: Wrath of Khan. En este trabajo primeramente se describen varios usos y aplicaciones de los sistemas de partículas y su simulación como son: fuego, agua, hierba, nubes, y objetos difusos en general. Por último, se describe y presenta el **“efecto génesis”** sobre una esfera que simula ser un planeta y la colisión entre los proyectiles y el planeta en cuestión (para una referencia completa véase [13]). En [5] se aprecia la relevancia que se otorga a la enseñanza, manejo y aplicación de sistemas de partículas. Se ha tomado como base la técnica de simulación con visualización del modelado basado en física, el cual comienza con la definición del problema como un modelo físico, que parte de la realidad, con ciertos atributos que se desean simular y visualizar.

Seguidamente se toma este modelo y se genera un modelo matemático que resulta ser generalmente, un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales. Se resuelven las ecuaciones usando métodos numéricos instrumentando la solución en computadora [4]. Por último, se realiza la traducción de los resultados numéricos hacia las gráficas por computadora, utilizando varias herramientas computacionales, a este proceso se le denomina rendering. Finalmente se verifica el realismo de las gráficas por computadora, y se corrige el modelo de manera iterativa. Así el modelado basado en física puede ser aplicado a los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza o artificiales [1][5].

En la sección 2 se reseña el modelo físico de los fuegos artificiales, así como la descripción del modelo matemático que representa el comportamiento del sistema en dos fases, antes de la explosión y en la explosión.

En la sección 3 se describen los resultados de la instrumentación numérica realizada en python, así como la visualización realizada para este problema mediante PyOpenGL y las herramientas de Phyton.

En la sección 4 se desarrolla una discusión de los resultados, su interpretación alrededor de la visualización y también de la instrumentación numérica. Además, se trata de valorar las herramientas de software utilizadas para lograr realismo.

Por último, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo que incluyen los logros realizados y aportaciones del trabajo, así como los potenciales retos que se tienen para generar trabajos futuros.

## 2. Desarrollo

### Modelo Físico

En este problema se observa un fuego artificial que es lanzado de manera vertical hacia el cenit. Posteriormente y a cierta altura dependiendo de la fuerza y de la carga que contiene, explota generando un conjunto de partículas que se dispersan alrededor del centro, con distintas tonalidades o con una sola tonalidad. Por último, el conjunto de partículas dispersas alrededor del centro se apaga debido a que la energía se disipa y por ende la luminosidad. Finalmente, las partículas apagadas caen por efecto de la gravedad.

Este problema se puede modelar como un problema de fuerzas, luego la formulación más importante es la de la segunda ley de Newton, ecuación 1 [3].

$$F = ma \quad (1)$$

Así que el movimiento de la ecuación 1, se da en el eje de las  $y$ , y no existe movimiento en el eje de las  $x$ , lo cual significa que la fuerza que está en contra de la subida es la gravedad. Dado esto, es importante considerar el colocar una fuerza que supere la gravedad, para alcanzar cierta altura [3].

Se puede separar antes y después de la explosión, en dos momentos físicos importantes. Luego las ecuaciones para cada momento son la misma ecuación (1) para el momento 1 y la ecuación con gravedad para el momento 2 como se ve a continuación  $a = -g$ , así de manera general llega un momento a la altura máxima donde las fuerzas están en equilibrio como se ve en ecuación 2 [3][4].

$$F_1 + F_2 = 0 \quad (2)$$

Se sabe además que las ecuaciones 3a y 3b representan ambas fuerzas.

$$F_1 = ma, \quad (3a)$$

$$F_2 = mg \quad (3b)$$

Ahora bien, existe un momento de explosión, donde las partículas juntas llegan al punto máximo de altura y en ese momento explota. Dado este modelo físico, se puede generar un modelo matemático.

### Modelo Matemático

Una vez descrito el modelo físico a través de las ecuaciones que se presentaron. Dadas las ecuaciones 3a y 3b se tiene que ajustar de manera conveniente los valores de la masa y la fuerza.

El parámetro de aceleración se puede considerar como  $\frac{dv}{dx} = a$  y lo mismo para la ecuación 3b [3]. Así se forman dos ecuaciones diferenciales, esta ecuación permite conocer la velocidad en cada punto. Posteriormente la transformación del modelo físico al modelo matemático debe de considerarse en una ecuación diferencial, y la masa igual a 1 unidad [4], ecuación 4.

$$\frac{dv_{y_{ant}}}{dy} = a, v_{y_0} = 0 \quad (4)$$

Esto es una ecuación diferencial ordinaria con condiciones iniciales, de la misma manera para cuando las partículas se someten a la acción de la gravedad después de la explosión, la ecuación 4 se transforma en ecuación 5 [3][5].

$$\frac{dv_{y_{des}}}{dy} = -g, v_0 = 0 \quad (5)$$

Ahora bien, ya que se conoce la velocidad en cada punto, es decir, en cada posición, es posible conocer de la misma forma la posición, aplicando la misma forma de la ecuación diferencial pero ahora a la posición, y tomando la velocidad como parámetro de la ecuación 4 y 5 se obtienen ecuaciones 6a y 6b.

$$\frac{dy}{dt} = v_{ant}, y_{0_{ant}} = 0 \quad (6a)$$

$$\frac{dy}{dt} = v_{des}, y_{0_{des}} = 0 \quad (6b)$$

Ahora las ecuaciones (4) y (5) proveen los parámetros necesarios para el cálculo de la posición que hacía falta [4].



La explosión se tratará como un problema de partículas de manera aleatoria con movimiento en el eje  $0$ . Se tiene una fuerza explosiva que “avienta” a las partículas hacia distintos lugares del escenario propuesto.

Ya que ahora se tiene un modelo matemático, se procederá a implementar una solución a este mediante la computadora, utilizando para ello una implementación de métodos numéricos.

### Instrumentación Numérica

El método que se utilizó para realizar la solución es el método de Euler para solución de ecuaciones diferenciales ordinarias. Dada la simplicidad del método, su orden de complejidad bajo y la naturaleza de la ecuación diferencial [2].

El método de Euler tiene como objetivo obtener una aproximación a un problema bien planteado con valores iniciales, ecuación 7.

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), a \leq t \leq b, y(a) = \alpha \quad (7)$$

Se trata entonces de encontrar aproximaciones a la solución en los puntos específicos del intervalo  $[a, b]$ , llamados puntos de red [2].

Se estipula primeramente que los puntos son igualmente espaciados y se toma un entero positivo y los puntos de red en el intervalo para construir la aproximación, ecuación 8.

$$t_i = a + ih, \text{ para cada } i = 0, 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

Así la distancia común para los puntos denotada por  $h = (b - a)/N$  se denominará tamaño de paso. Seguidamente y después de aplicar el teorema de Taylor y ajuste al error se obtienen ecuaciones 9a y 9b.

$$\omega_0 = \alpha \quad (9a)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + hf(t_i, \omega_i) \quad (9b)$$

La ecuación 9b es también llamada ecuación de diferencias. Luego se construye el método de Euler como se muestra en la figura 1 [2][4].

Para aproximar la solución del problema de valor inicial  
 $y' = f(t, y), a \leq t \leq b, y(a) = \alpha$

En (N+1) números uniformemente espaciados en el intervalo [a,b]:

**ENTRADA** extremos a, b; entero N: condición inicial  $\alpha$

**SALIDA** aproximación  $\omega$  y en los (N+1) valores de t

**Paso 1** Tome  $h = \frac{b-a}{N}$

$t = a$   
 $\omega = \alpha$

**Paso 2** Para  $i=1, 2, \dots, N$  haga pasos 3 y 4

**Paso 3** Haga  $\omega = \omega + hf(t, \omega)$ ;  
 $t = a + ih$

**Paso 4** SALIDA  $(t, \omega)$

Figura 1 Método de Euler para solucionar Ecuaciones Diferenciales Ordinarias.

## Visualización y Rendering

Al realizar la instrumentación numérica del método de Euler, en Python, se encuentran los parámetros de la velocidad y de la posición de las partículas antes y después de la explosión, en el eje de movimiento (eje y) [4] [6].

Primeramente, se elige la API, en este caso OpenGL. Entonces es necesario incluir las librerías de OpenGL a Python, para lo cual se utilizó PyOpenGL, que es una API que los interconecta, siendo multiplataforma y bastante usada para realizar aplicaciones y de visualización mediante Python [8] [9].

Para realizar la explosión, se modeló como un evento aleatorio con movimientos en el eje z, es decir, hacia el espectador. Para lograr esto, se debe tomar en cuenta que las coordenadas en el eje z cambian de forma aleatoria, incluso hacia atrás del origen que se ha planteado para este modelo [4][7].

Por último, estos resultados que se obtienen mediante la instrumentación numérica son adecuados a las variables construidas en la implementación para la visualización, así se logra el rendering, además de aprovechar la conexión e importación de las librerías gráficas [9].

Al tener una buena aproximación y convergencia del método numérico es posible tener un buen grado de realismo en la simulación con visualización, aprovechando las características de OpenGL, tales como generación de puntos y partículas de diversos tamaños, transformación de coordenadas, translación, entre otras muchas características gráficas [6].

### 3. Resultados

Dada la instrumentación del método de Euler mediante Python se tiene un diagrama de clases que se puede ver en la figura 2, hay una generalización de la clase partícula, es decir, se toma una clase llamada partícula y se crean los objetos, cientos o miles de estos objetos y se posicionan en un lugar de origen para comenzar la visualización.

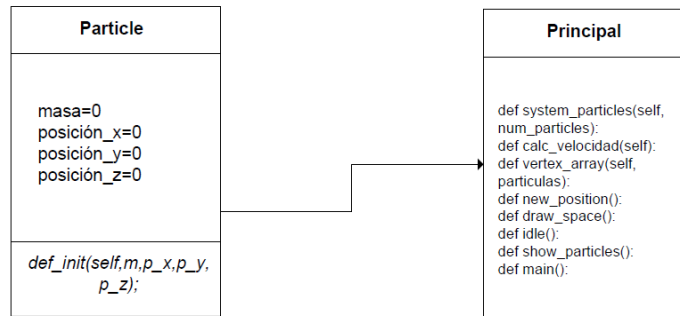


Figura 2 Diagrama de Clases de la Simulación de Fuegos Artificiales.

Cabe mencionar que la generación de un arreglo de objetos para controlar las partículas resulta adecuada y se adapta a la implementación que se está realizando [7][8].

Las clases necesarias para crear un mundo virtual se importan de OpenGL[9]. Así desde la clase principal se controla la visualización de las partículas utilizando PyOpenGL, adaptando las estructuras de datos al problema [4].

A continuación, se muestran los resultados de la visualización, en la corrida del programa en figura 3, 4, 5 y 6 [4] [6].

La visualización comienza con la subida hasta el punto máximo donde es “aventado” hacia la vertical, las translaciones del sistema son programadas por medio de las funciones propias de OpenGL, véase la figura 3.

En un segundo momento las partículas llegan al punto máximo, iniciando la explosión con un movimiento alrededor de la esfera con centro donde llego después de haber sido lanzadas hacia la vertical en el eje y, obsérvese la figura 4.

En un tercer momento las partículas se continúan separando cada vez más hasta llegar al punto de máxima exclusión, todo el movimiento que se puede observar esta sobre el eje z, como se puede ver en la figura 5.

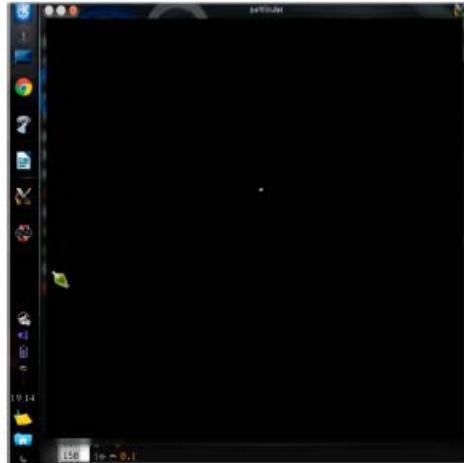


Figura 3 Fuego artificial llegando hacia el punto más elevado.

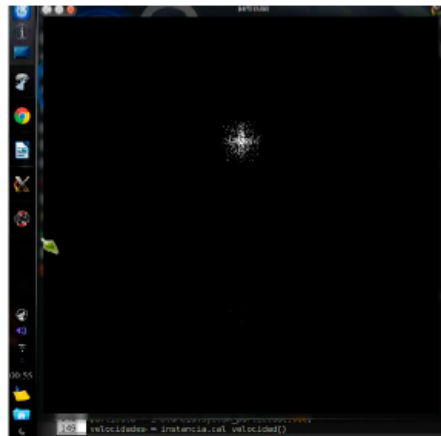


Figura 4 Partículas comenzando la explosión.

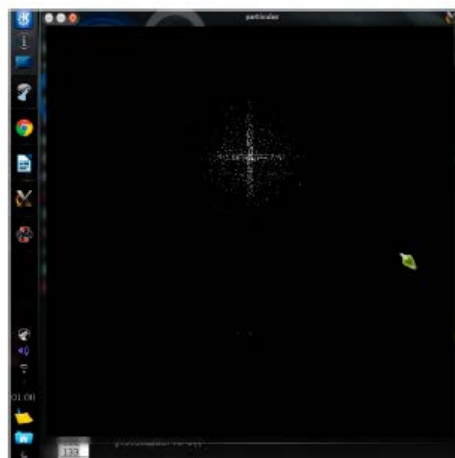


Figura 5 Partículas llegando a su máximo alrededor de esfera, centro en altura máxima.

Por último, las partículas se detienen y por efecto de la gravedad comienzan a caer cuando la explosión termina. Además, las partículas se apagan y comienzan a morir, para este caso van desapareciendo y se pintan del color de fondo, como se aprecia en la figura 6.

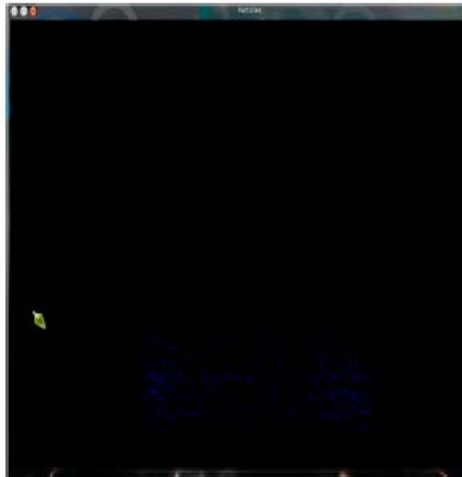


Figura 6 Fin de la explosión y comienza la muerte de las partículas.

#### **4. Discusión**

En los resultados que se han presentado, existen dos aspectos importantes a considerar: por un lado, está el comportamiento y número de las partículas para lograr un buen grado de realismo, y el otro aspecto es la forma como se considera el sistema de forma computacional y como se adapta la programación de manera conveniente en la solución del problema planteado.

En el contexto del comportamiento de las partículas se observa como hasta antes de la explosión no existe mayor problemática, dado que las ecuaciones están bien definidas y se resuelven obteniendo un grado de realismo aceptable, lo mismo sucede con el momento después de la explosión las partículas caen por gravedad y se apagan para ir al fondo de la animación.

La problemática de la explosión es resuelta con un modelo aleatorio, se puede observar un patrón muy bien definido, que en un momento dado puede repetirse y generar una visualización no muy atractiva al espectador, dado el movimiento de las mismas o que siempre se visualice el mismo, esto se puede resolver si se

utilizan distribuciones de probabilidad con variable aleatoria discreta o continua, que provoquen que el movimiento sea diverso, sin perder de vista que se forma una esfera alrededor del punto de la altura máxima.

Por otra parte, el lenguaje de programación, la API y la API gráfica utilizadas, se adaptan bastante bien a este problema en particular y a problemas similares al planteado en este trabajo. El paradigma de Python orientado a objetos permite el uso de estructura de datos que no requiere grandes prestaciones para simular una partícula, ya que como se mencionó, mediante la generación de miles de partículas la simulación tiene un grado de realismo aceptable para este problema en particular.

Además de todo lo anterior, los objetos gráficos que se pueden utilizar, gestionar y visualizar mediante OpenGL son fáciles de implementar con el paradigma orientado a objetos, adicionalmente la complejidad espacial de la solución del problema es reducida comparada con otros lenguajes estructurados e incluso orientados a objetos como Java. La citada complejidad se puede reducir, aún más, aprovechando las características de Python, dado que se realiza un mayor número de operaciones, tanto matemáticas, como sobre los datos con relativamente pocas instrucciones y número pequeño de líneas de código.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se ha presentado la simulación con visualización de Fuegos Artificiales mediante la técnica de simulación del modelado basado en física utilizando Python. Cada etapa del método ha sido presentada y se ha obtenido una visualización mediante el uso de PyOpenGL. Es importante decir que el paradigma orientado a objetos resulta adecuado en la visualización y que se adapta a las necesidades de objetos gráficos y estructuras necesarias para su gestión dentro de la mencionada simulación, obteniendo una visualización con un realismo aceptable.

En el caso de la explosión y el comportamiento de las partículas se puede ampliar el trabajo hacia la experimentación con otras distribuciones de partículas que generen otras figuras, que, si bien deben tener un comportamiento aleatorio, están

delimitadas por las fuerzas físicas a una esfera con centro en el punto máximo de la altura. Además de lo anterior se ha experimentado con un sistema de partículas en el orden de los millares, se puede optimizar la gestión de las partículas para lograr manejar sistemas de mayor orden.

Por último, al obtener una clase que simula el comportamiento de las partículas en un fuego artificial, es posible generar más fuegos artificiales de distintos colores y comportamientos.

Se puede, además, interactuar con otros elementos del mundo virtual que se crea, aprovechando las ventajas del lenguaje de programación y la forma como se está tratando el problema. Así este método se puede extender a otras aplicaciones de software que involucren el uso de sistemas de partículas.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] P. Baker, D. Hearn, Gráficos por computadora con OpenGL. 3ra. Edición. Prentice Hall.
- [2] R. L. Burden, J. D. Faires, Análisis Numérico. Novena Edición. 2011. Cenage Learning.
- [3] R. A. Serway, Física. 2V. Cuarta Edición. 1997. McGraw Hill. México.
- [4] J. Vázquez Valencia, J. D. Alanís Urquieta, Implementación de Sistema de Partículas en Python con herramienta gráfica opengl. 2014. Tesina de TSU en TICS, Universidad Tecnológica de Puebla,
- [5] A. Witkin, D. Baraff, Physically Based Modelling. Carnegie Mellon University. Online ACM Siggraph '97 Course notes.
- [6] Wright, S. Richard, OpenGL Super Bible. 1965. Addison-Wesley.
- [7] <https://docs.python.org/2/library/math.html>. Agosto 2015
- [8] <https://docs.python.org/2/library/random.html>. Agosto 2015
- [9] [http://serdis.dis.ulpgc.es/~atrujill/iga/ficheros/Intro\\_GLUT.pdf](http://serdis.dis.ulpgc.es/~atrujill/iga/ficheros/Intro_GLUT.pdf). Agosto 2015
- [10] <http://dle.rae.es/?id=IYNxrTR>. Junio 2016
- [11] <http://www.notdoppler.com/fireworks.php>. Agosto 2016
- [12] [www.fwsim.com](http://www.fwsim.com). Agosto 2016
- [13] <http://www.di.ubi.pt/~agomes/tjv/teoricas/09-particles.pdf>. Agosto 2016

## **7. Autores**

José David Alanís Urquieta, es Licenciado en Ciencias de la Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Maestro en Ciencias de la computación con especialidad en cómputo científico y Doctor en Tecnologías de la Información y Comunicación por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Blanca Bermúdez Juárez, es Licenciado en Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Maestra en Sistemas de Información, Universidad de las Américas Puebla. Doctorado en Matemáticas por la Universidad Autónoma Metropolitana. Profesor con Perfil Deseable PRODEP y Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I.

Joel Vázquez Valencia, es Ingeniero en Tecnologías de la Información y Comunicación, por la Universidad Tecnológica de Puebla, actualmente trabaja en la empresa Autotodo Mexicana como Desarrollador de Aplicaciones.

Marisol Calderón González, tiene el título de Licenciado en Ciencias de la Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Maestría en Sistemas Computacionales por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

María Luisa Morales Hernández, tiene el título de Licenciado en Ciencias de la Computación por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y la Maestría en Ingeniería Administrativa.



# **TECNOLOGÍA MÓVIL PARA EVALUAR LA CALIDAD DE LAS HERRAMIENTAS DE DISEÑO RÁPIDO PARA GENERAR SISTEMAS DE INFORMACIÓN**

***Laura Silvia Vargas Pérez***

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

*laura.silvia.vargas@gmail.com*

***Ana María Soto Hernández***

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

*sotohana@yahoo.com*

***Jorge Peralta Escobar***

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero

*jperalta3008@gmail.com*

***Agustín Francisco Gutiérrez Tornés***

Universidad Autónoma de Guerrero

*afgutierrez@uagro.mx*

***Edgardo Manuel Felipe Riverón***

Centro de Investigación en Computación C.I.C. del I.P.N.

*edgardo@cic.ipn.mx*

***Carlos Eduardo Uc Rios***

Universidad Autónoma de Campeche

*carlos.uc@unini.edu.mx*

***Vanessa Atenea Vargas Pérez***

Universidad Autónoma de Tamaulipas, FI UAT, Tampico, Tamaulipas

*vanessa.atenea@gmail.com*

## Resumen

En el mundo globalizado se requiere contar con herramientas de software que faciliten el desarrollo de aplicaciones rápidas para generar sistemas de información de calidad. La formación de los ingenieros informáticos debe incluir métodos que permitan su evaluación, utilizando las nuevas tecnologías, como la móvil, por ser la más popular. Se propone una metodología para realizar la evaluación técnica de la calidad de las herramientas de diseño de aplicaciones rápidas (RAD tools) para generar sistemas de información, de cualquier tipo, en ambientes visuales, con la cual es posible seleccionar, de manera eficaz y fácil, las mejores herramientas, utilizando la tecnología móvil (tabletas). Los casos de estudio elegidos para las pruebas a las herramientas RAD son las plataformas visuales comerciales (IDE: Entornos de Desarrollo Integrado) Visual Studio.Net, Eclipse y Net Beans. El proceso de prueba se realizó con usuarios expertos (estudiantes de posgrado y profesores) y con novatos (estudiantes de licenciatura) en sistemas computacionales, en instituciones de educación superior, pero también a organizaciones, empresas u otros usuarios finales que desarrollan aplicaciones informáticas, que lo requieran.

**Palabra(s) clave(s):** Ambiente visual, calidad de software, herramientas RAD, modelo de evaluación técnica.

## 1. Introducción

Para mejorar cualquier *software* se requiere evaluar sus atributos. Para ello se utiliza un conjunto de medidas y métricas significativas, que proporcionan indicadores como estrategia de evaluación técnica de la calidad del producto establecida. Este proceso se implementa con una metodología para valorar los requerimientos específicos que el producto de *software* debe cumplir. Es importante que las mediciones sean fáciles de calcular e interpretar en su ejecución y se eliminen ambigüedades. Algunas veces la definición académica de las características de calidad no permite medirlas directamente, por lo cual se requiere establecer métricas que las correlacionen objetivamente con un producto de *software* [16].

El primer paso en la evaluación de un *software* es la determinación de las propiedades relevantes de calidad a considerar mediante un modelo de calidad específico. Éste identifica las características de calidad y sus interrelaciones con los elementos en que se descompone, para facilitar la evaluación cualitativa y cuantitativa del producto. De acuerdo con Gutiérrez [3, 4], generalmente se presentan en formato de árbol de estructura jerárquica donde aparecen las características en su nivel más alto, las subcaracterísticas en el intermedio y los atributos en el más bajo [7, 8, 9, 10, 11].

En la formación de los estudiantes de ingeniería, para enfrentar los retos globales, es primordial conocer las diferentes metodologías que permitan la evaluación de todo tipo de herramientas, que les ayude a medir y a elevar la calidad en sus productos y procesos; se requiere contar, también, con herramientas de software que faciliten el desarrollo de aplicaciones rápidas para generar sistemas de información estandarizados, de cualquier tipo, y que permitan ser evaluados para determinar su calidad.

### **Tipos de medidas**

El tipo de medición requerido depende del propósito de la evaluación. Si el propósito primario es entender y corregir deficiencias, muchas de las mediciones que se realizan son para monitorear y controlar las mejoras. Si se trata de comparar la calidad de un producto con productos alternativos o contra requerimientos, es importante que la especificación de la evaluación se base en un modelo de calidad preciso, métodos de medición, escalas, y rango de niveles para cada métrica, como la norma ISO/IEC 9241 [10].

A nivel internacional surgen periódicamente herramientas para facilitar la creación de nuevos sistemas de información, lo que implica realizar evaluaciones sobre la calidad de estas herramientas para una selección adecuada en determinado entorno de desarrollo.

Tal es el caso de la evaluación y selección de las herramientas conocidas como RAD (*Rapid Application Development*) que forman parte de un IDE (*Integrated Development Environment* -Entorno o Ambiente de Desarrollo Integrado- que

constituye el marco de trabajo de los programadores de aplicaciones para crear sistemas de información, en general.

### **Objetivo**

La formación de ingenieros informáticos debe incluir métodos que les permitan evaluar aquellas herramientas que van a utilizar para el desarrollo de nuevos sistemas de información o aplicaciones informáticas. Para ello, se propone la utilización de la metodología propia que permite hacer un análisis comparativo de diferentes tipos de herramientas para el desarrollo de aplicaciones en ambientes visuales, mediante una propuesta de métricas de calidad [18].

### **Estado del arte y trabajos relacionados**

Desde hace algunos años se han estado proponiendo diversos tipos de modelos de calidad que se han convertido en estándares: ISO/IEC 25000 [11], ISO/IEC 14598 [9], ISO/IEC 9126 [8], así como las IEEE 1061 [7], IEEE 610 [6]. Estos modelos son muy útiles, ya que proporcionan el manejo de métricas y procesos de evaluación de software, pero son muy genéricos, por lo que deben adaptarse para su utilización práctica.

La gran mayoría de los trabajos asociados con esta temática se enfoca a la evaluación de la calidad en el desarrollo de software, como los de Cochea [1], donde implementó métricas de calidad para establecer la posibilidad de obtener la certificación de calidad en el desarrollo de sus productos de software a medida. Olsina [14] cuya especialidad es la aplicación de métricas para evaluar aplicaciones WEB y E-learning, Piattini [15] su trabajo está enfocado a la aplicación de las métricas para los modelos de Procesos de Negocios, Moreno [13] utiliza las Métricas de Calidad del Software para evaluar las aplicaciones de Gramáticas de Contexto. No se encontraron antecedentes donde se evalúe, de manera directa, las herramientas RAD dentro de los IDE's, lo que se ha encontrado tiene, como se comentó, otros fines diversos, para otras aplicaciones de software, más específicas, pero no se contempla este caso específico, donde se evalúa la calidad en uso de las herramientas RAD para implementar Sistemas

de Información, de cualquier tipo, y para aplicaciones genéricas, de manera muy general. En este trabajo se desarrolló la metodología, utilizando los modelos y estándares mencionados, tomando características, subcaracterísticas y atributos distintos de cada uno [3, 4], además de otras cualidades del Inventario de Medidas de Usabilidad del Software SUMI [5], y desarrollando sus propias métricas de evaluación.

## 2. Desarrollo

Se generó una metodología propia con modelos, procesos, técnicas y herramientas, que permite hacer cuadros comparativos para realizar la evaluación técnica de las herramientas RAD. El modelo propuesto se basa en la fusión: adopción y adaptación de las contribuciones señaladas más arriba, para conformar la arquitectura del modelo. Es necesario precisar que las aplicaciones utilizadas para probar la metodología son productos comerciales por lo que no se dispone de la información concerniente a su código fuente. Lo anterior implica que no se tomaron en cuenta las métricas internas.

### Proceso de evaluación

Las actividades de evaluación en el modelo propuesto son las que se indican en la figura 1, donde se observa que aquellos atributos relacionados con la calidad en uso tiene una importancia singular, ya que es desde el punto de vista del usuario.

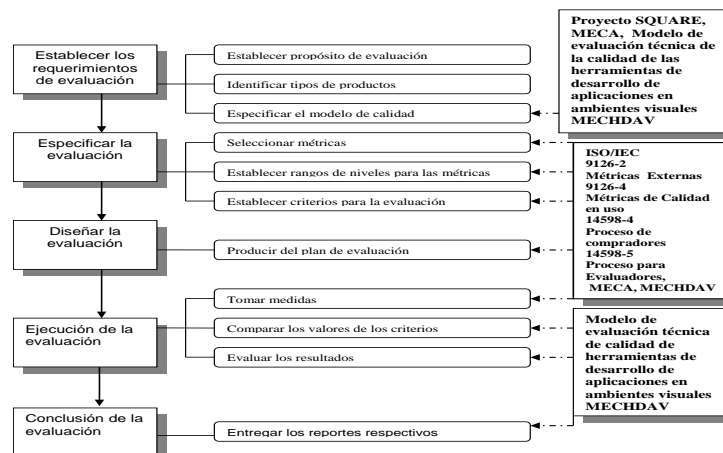


Figura 1 Proceso de evaluación para el modelo propuesto MECHDAV.

La relación de la calidad en uso con las otras características de calidad del software depende del tipo de usuario, como aquel para quien la calidad en uso es principalmente el resultado de la evaluación de la funcionalidad, la confiabilidad, la usabilidad, la eficiencia y la reusabilidad [3, 4, 5].

### Compactación del modelo propuesto

El modelo que se presenta está compuesto por cualidades específicas del *software* (características), subcaracterísticas, atributos y métricas, los cuales se agrupan en dos continentes: el modelo completo y el compacto, para facilitar su enseñanza y comprensión. El uso del modelo completo se recomienda para usuarios expertos, profesores y alumnos de semestres avanzados de ingeniería y posgrado que desarrollan aplicaciones de *software*. Para los usuarios novatos y los alumnos de los primeros semestres de ingeniería se recomienda el modelo compacto (figura 2), *Subconjunto* del modelo MECHDAV. sugerido para la evaluación del producto por un usuario principiante.

#### Característica / Subcaracterística / Atributo / métrica

- 1.3.1.1 **Funcionalidad/Corrección** / Correspondencia de las descripciones con los objetos métrica
- 1.3.3.1 **Funcionalidad/ Corrección** / Utilización correcta del idioma / métrica
- 1.5.1.1 **Funcionalidad/ Normalización** / Normalización de la simbología / métrica
- 1.5.2.1 **Funcionalidad / Normalización**/Normalización del vocabulario / métrica
- 3.1.1.1 **Usabilidad / Aprendibilidad** /Demo / métrica
- 3.1.2.1 **Usabilidad / Aprendibilidad** /Eficacia del Demo / métrica
- 3.1.3.1 **Usabilidad / Aprendibilidad** / Tutorial / métrica
- 3.1.4.1 **Usabilidad / Aprendibilidad** /Eficacia del Tutorial / métrica
- 3.1.5.1 **Usabilidad / Aprendibilidad** /Documentación / métrica
- 3.2.1.1 **Usabilidad / Atractividad** /Interacción atractiva / métrica
- 3.3.1.1 **Usabilidad / Comprensibilidad** /Ayuda en línea / métrica
- 3.3.2.1 **Usabilidad / Comprensibilidad** /Interfaz de usuario adecuada / métrica
- 3.3.3.1 **Usabilidad / Comprensibilidad** /Terminología acorde al usuario / métrica
- 3.4.1.1 **Usabilidad / Difusión** /Amplitud / métrica
- 3.4.2.1 **Usabilidad / Difusión** /Frecuencia de operación / métrica
- 3.5.1.1 **Usabilidad / Operabilidad**/Operabilidad de las ayudas / métrica
- 3.5.2.1 **Usabilidad / Operabilidad** /Utilidad de las ayudas / métrica
- 5.1.1.1 **Portabilidad / Instalabilidad** /Módulo de instalación / métrica
- 5.1.2.1 **Portabilidad / Instalabilidad** /Documentación del módulo de instalación / métrica
- 5.1.3.1 **Portabilidad / Instalabilidad** /Módulo de configuración / métrica
- 5.1.4.1 **Portabilidad / Instalabilidad** /Documentación del módulo de configuración / métrica
- 6.3.1.1 **Calidad en uso / Satisfacción** / efectos psicológicos favoritos de usuario: SUMI métricas

Figura 2 *Subconjunto* del modelo MECHDAV.

En la figura 3 se muestra el modelo MECHDAV completo, ya que este modelo es el que contiene todos los elementos requeridos para evaluar las herramientas RAD, y las métricas con las que se efectúan los cálculos que determinan la calificación de la calidad de estas herramientas. Aunque uno de los propósitos de la aplicación de este modelo de evaluación técnica es la de proporcionar un medio de comparación objetivo entre diversos productos de *software* dentro de un ambiente visual para cualquier tipo de usuario (sea experto o principiante).

### Características /Subcaracterísticas / Atributo / Métrica

- 1.1.1.1 Funcionalidad / **Compleitud** / Contenido total / métrica
- 1.2.1.1 Funcionalidad / **Consistencia** / Uniformidad del formato de los elementos funcionales / métrica
- 1.2.2.1 Funcionalidad/ **Consistencia** / Uniformidad de retorno al procesamiento / métrica
- 1.2.3.1 Funcionalidad/ **Consistencia** /Uniformidad del vocabulario y de la simbología utilizada / métrica
- 1.3.1.1 Funcionalidad/ **Corrección** / Correspondencia de las descripciones con los objetos / métrica
- 1.3.2.1 Funcionalidad/ **Corrección** / Funcionamiento correcto / métrica
- 1.3.3.1 Funcionalidad/ **Corrección** / Utilización correcta del idioma / métrica
- 1.4.1.1 Funcionalidad/ **Interoperabilidad** / Intercambiabilidad de datos / métrica
- 1.4.2.1 Funcionalidad/ **Interoperabilidad** / Intercambiabilidad en componentes e interfaces / métrica
- 1.5.1.1 Funcionalidad/ **Normalización** / Normalización de la simbología / métrica
- 1.5.2.1 Funcionalidad / **Normalización** / Normalización del vocabulario / métrica
- 2.1.1.1 Confiabilidad / **Madurez** / Frecuencia de fallas / métrica
- 2.2.1.1 Confiabilidad / **Recuperabilidad** / Opciones de recuperabilidad / métrica
- 2.3.1.1 Confiabilidad / **Tolerancia de errores o fallos** / Procesamiento degradado / métrica
- 2.3.2.1 Confiabilidad/ **Tolerancia de errores o fallos** / Tratamiento de errores / métrica
- 3.1.1.1 Usabilidad / **Aprendibilidad** / Demo / métrica
- 3.1.2.1 Usabilidad / **Aprendibilidad** / Eficacia del Demo / métrica
- 3.1.3.1 Usabilidad / **Aprendibilidad** / Tutorial / métrica
- 3.1.4.1 Usabilidad / **Aprendibilidad** / Eficacia del Tutorial / métrica
- 3.1.5.1 Usabilidad / **Aprendibilidad** / Documentación / métrica
- 3.2.1.1 Usabilidad / **Atractividad** / Interacción atractiva / métrica
- 3.2.2.1 Usabilidad / **Atractividad** / Recuperación exitosa / métrica
- 3.2.3.1 Usabilidad / **Atractividad** / Tiempo de operación / métrica
- 3.3.1.1 Usabilidad / **Comprensibilidad** / Ayuda en línea / métrica
- 3.3.2.1 Usabilidad / **Comprensibilidad** / Interfaz de usuario adecuada / métrica
- 3.3.3.1 Usabilidad / **Comprensibilidad** / Terminología acorde al usuario / métrica
- 3.4.1.1 Usabilidad / **Difusión** / Amplitud / métrica
- 3.4.2.1 Usabilidad / **Difusión** / Frecuencia de operación / métrica
- 3.5.1.1 Usabilidad / **Operabilidad** / Operabilidad de las ayudas / métricas
- 3.5.2.1 Usabilidad / **Operabilidad** / Utilidad de las ayudas / métrica
- 4.1.1.1 Eficiencia / **Escalabilidad** / Disponibilidad / métrica.
- 4.2.1.1 Eficiencia / **Uso de los recursos** / Eficiencia en los recursos / métrica
- 4.3.1.1 Eficiencia / **Uso del tiempo** / Eficiencia en tiempo / métrica
- 5.1.1.1 Portabilidad / **Instalabilidad** / Módulo de instalación / métrica
- 5.1.2.1 Portabilidad / **Instalabilidad** / Documentación del módulo de instalación / métrica
- 5.1.3.1 Portabilidad / **Instalabilidad** / Módulo de configuración / métrica.
- 5.1.4.1 Portabilidad / **Instalabilidad** / Documentación del módulo de configuración / métrica.
- 5.2.1.1 Portabilidad / **Adaptabilidad** / Independencia del hardware / métrica.
- 5.2.2.1 Portabilidad / **Adaptabilidad** / Independencia del ambiente de software / métrica.
- 6.1.1.1 Calidad en uso / **Eficacia** / Eficacia de tareas / métrica.
- 6.1.2.1 Calidad en uso / **Eficacia** / Rendimiento de tareas / métrica.
- 6.2.1.1 Calidad en uso / **Productividad** / Eficiencia relativa al usuario / métrica.
- 6.2.2.1 Calidad en uso / **Productividad** / Proporción productiva / métrica.
- 6.3.1.1 Calidad en uso / **Satisfacción** / efectos psicológicos favoritos de usuario: SUMI métricas.

Figura 3 Modelo MECHDAV completo.

## Definición de las métricas y de la escala evaluativa

Las evaluaciones se realizan midiendo los atributos a los que se les asigna una métrica correspondiente. El resultado, el valor medido, puede ser *mapeado* sobre una escala. Este valor no muestra en sí mismo el nivel de satisfacción de los requerimientos. Para este propósito la escala se divide en rangos que definen el grado de satisfacción.

El modelo utiliza dos maneras para hacerlo:

- Dividir la escala en dos categorías como son insatisfactorio y satisfactorio.
- Dividir la escala en cinco niveles o categorías denominadas A, B, C, D y E.

Observar la figura 4. Dado que en la norma IEEE 610 [6] se define la métrica como “una medida cuantitativa del grado en que un sistema, componente o proceso posee un atributo dado”, para usar la segunda forma se propone un conjunto de rangos de escala numérica donde se califica cada una de las métricas.

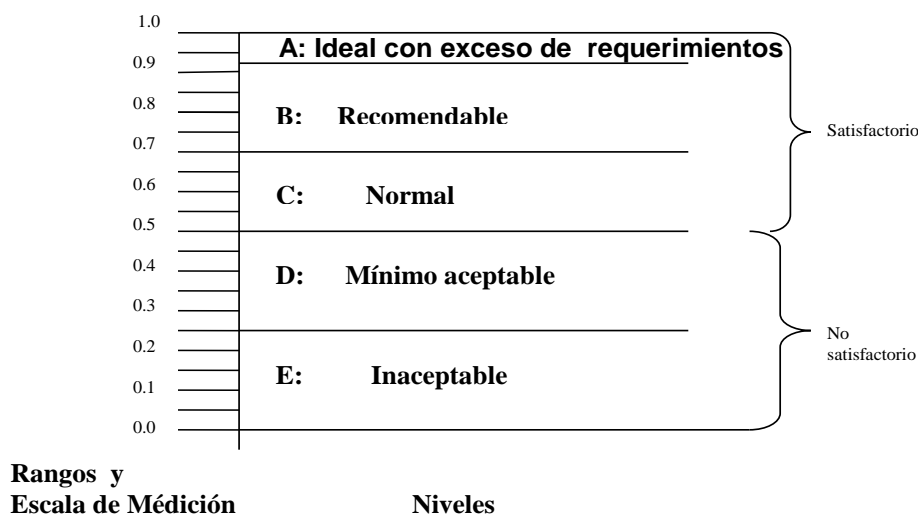


Figura 4 Rangos y escala de medición para las métricas.

La evaluación se realiza llenando un cuestionario donde, al seleccionar una respuesta, se determina el valor de la métrica, asociada a la escala presentada en la tabla 1. Para respaldar este modelo se han desarrollado y documentado 44 métricas, tal como aparece en el formato de la figura 5, más 11 métricas más, que corresponden a la característica: Calidad en Uso; subcaracterística: Satisfacción; atributo: Efectos psicológicos de usuario.



Tabla 1. Interpretación de rangos de niveles de métricas.

VALOR	% CUMPLIMIENTO	SIGNIFICADO / INTERPRETACIÓN	RANGO
1.0	90 - 100	Excelente / Siempre	A
0.8	70 - 89	Satisfactorio / Casi siempre	B
0.6	50 - 69	Aceptable / Regularmente	C
0.4	30 - 49	Deficiente / En ocasiones	D
0.0	0 - 29	Inaceptable / Nunca o raras veces	E

**Característica: 3. USABILIDAD.**

**Subcaracterística: 3.5 Operabilidad.**

**Atributo: 3.5.2 Operabilidad de las ayudas.**

**Métrica: 3.5.2.1 Relación de resultados exitosos mediante la facilidad de operación de las ayudas del software.**

**Objetivo:** Determinar la relación del esfuerzo realizado por el usuario para obtener primeros resultados exitosos mediante la facilidad de operación de las ayudas del software.

**Método:** Analizar los componentes de cada herramienta para determinar la relación de resultados exitosos mediante la facilidad de operación de las ayudas del software.

**Fórmula:**  $X = A/B$

**Evaluación:**  $E(x) = \{ (0,0), (0.4, 40), (0.6, 60), (0.8, 80), (1,100) \}$

**Medidas:** A= Número de primeras tareas cuyos objetivos son completados exitosamente, utilizando las ayudas.

B= Número de tareas intentadas por el usuario.

**Interpretación:** Guía interactiva (intentos de usuario en tareas exitosas)

$0 <= X <= 1$ ; lo más cercano a 1 es lo mejor.

**Fuente de referencia:** nueva de MECHDAV, ISO 9126.

Figura 5 Ejemplo de la documentación de una de las métricas utilizadas.

Las descripciones y aplicaciones de las métricas se enfocan en: la observación del comportamiento del *software* en cuanto a la diferencia entre los resultados de ejecución actuales y la especificación de los requerimientos (una vista de prueba y validación de calidad); las ocurrencias inesperadas del comportamiento en el tiempo o utilización de recursos durante la operación del *software*; las instrucciones directas al usuario para que realice una tarea específica, tomando nota de ciertos indicadores (por ejemplo: tiempo, número de ocurrencias de algún evento, etc.); y los cuestionamientos directos al usuario, en los cuales sólo se determina la existencia (presencia o ausencia) de la herramienta y/o la característica a analizar (atributos esenciales).

Y en la figura 6 se muestra la sistematización de la métrica mostrada en la figura 5.

Subcaracterística: **Operabilidad** 9 / 15  
 Atributo: **Utilidad de las ayudas**  
 Estimar la relación de éxito de la guía para principiantes. B = Nº de primeras tareas intentadas por el usuario (B>0). A = Nº de tareas de las cuales los objetivos son completados exitosamente en un primer intento por el usuario.

	A:	B:	X:
1) Espacios de trabajo:	8	10	0.8
2) Asistentes:	6	10	0.6
3) Editores de recursos:	6	10	0.6
4) Paneles de vistas jerárquicos:	8	10	0.8
5) Interprete de línea de comandos:	8	10	0.8
6) Biblioteca de clases base:	8	10	0.8
7) Acceso directo al API:	10	10	1
8) Herramientas de seguridad:	8	10	0.8
9) Generador de componentes:	8	10	0.8
10) Incorporación de componentes avanzados:	10	10	1
11) Servicios WEB:	8	10	0.8

Característica: **Usabilidad**

Anterior, Siguiente, Guardar, Cancelar, Respuesta

Figura 6 Muestra la sistematización de la métrica de la figura 5 dentro de la herramienta.

### 3. Resultados

Plasmar los resultados tanto parciales como totales de la evaluación de la calidad del *software* no es tarea fácil, por lo que se deben elegir formatos simples y comprensibles para conseguir una valoración rápida y confiable de la calidad de sus diferentes representaciones. Los casos de estudio elegidos para las pruebas de las herramientas RAD son las plataformas visuales comerciales Visual Studio.Net [12], Net Beans [17] y Eclipse [2] , en diferentes versiones. Estos paquetes de software no requieren la compra de las licencias, porque dos son productos de código abierto (Net Beans y Eclipse), son gratuitos y sin restricciones de uso; el único producto que es de licencia comercial para su venta (Visual Studio.Net), es otorgado a las instituciones educativas, para uso de sus estudiantes y docentes, de manera gratuita, durante el periodo escolar.

#### Prototipo de la herramienta de Software

El prototipo de PROYEVA fue desarrollado en ambiente WEB responsivo, con lenguajes de programación HTML5, CSS3 Javascript y PHP, además de un manejador de base de datos en MySQL que se instaló en un servidor HP Proliant DL380 con un sistema operativo de red Windows Server 2008, la red interna que se utilizó fue WIFI, y la recepción con 10 tabletas de 7" marca Lenovo y con un sistema operativo Android 4.2.

Este sistema fue probado y usado, con mucha aceptación, por estudiantes de licenciatura y de postgrado, quienes hicieron diversas pruebas a los paquetes de software mencionados, en los dispositivos móviles disponibles (tabletas). La tecnología móvil es lo que más utilizan los estudiantes, por lo práctica, moderna, económica, sencilla, llamativa y útil para realizar sus tareas escolares de diversos tipos, y se les genera una nueva aplicación para que ellos determinen la calidad de las diversas herramientas RAD con las que pueden construir sus sistemas de información, eligiendo las que muestren mayor puntaje en su calidad. Los resultados obtenidos por la evaluación técnica durante todo el proceso de medición, para cada una de las herramientas RAD -Visual Studio.Net, Net Beans y Eclipse- se muestran en las figuras 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Para este fin se eligieron formatos tales como listas de comprobación (*checklist*), tablas simples de relación y matrices de control.

	A	B	C	X:
1) Espacios de trabajo:	1	1	10	1
2) Asistentes:	1	1	10	1
3) Editores de recursos:	1	1	10	1
4) Paneles de vistas jerárquicos:	1	1	10	1
5) Interpretador de línea de comandos:	1	1	10	1
6) Biblioteca de clases base:	1	1	10	1
7) Acceso directo al API:	1	1	10	1
8) Herramientas de seguridad:	0	1	10	0.9
9) Generador de componentes:	1	1	10	1
10) Incorporación de componentes avanzados:	0	1	10	0.9
11) Servicios WEB:	0	1	10	0.9

Figura 7 Tablas de relación, valores ingresados se operan para obtener métrica atributo.

Atributo	Espacios_de_	Asistentes	Editores_de_	Paneles_de_	Interprete_de_	Biblioteca_de_	Acceso_directo	Herramientas	G
Contenido total	1	1	0.8	1	1	1	1	1	1
Uniformidad	1	0.8	1	1	1	1	1	1	1
Usabilidad	0.8	1	1	0.8	1	1	1	1	1
Utilización co	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Funcioname	1	1	0.8	1	0.8	0.8	1	1	1
Corresponde	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Intercambiabi	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6	0.4
Intercambiabi	0.8	0.6	0.8	0.6	1	1	1	1	1
Normalizació	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Normalizació	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Opciones de	1	1	1	1	1	1	1	0.9	1
Tratamiento	0.6	0.8	0.8	0.6	1	1	1	0.9	0.1

Figura 8 Matriz de control que se genera con evaluación del ambiente Visual Net Beans.

**Reporte de Evaluación del Software : Visual Studio.NET ver. 2003**

**MECHDAV**

Tipo de Evaluación: Experta  
 Nombre del Ambiente: Visual Studio.NET ver. 2003  
 Descripción: Ambiente visual utilizado en el desarrollo de aplicaciones creado por la e

Características	Promedio	Nivel de Clasificación	Criterio	Conclusiones
Funcionalidad	0.95	<input type="checkbox"/> Excelente	<input checked="" type="checkbox"/> Sin modificación	<input checked="" type="checkbox"/> Aceptado
Confiabilidad	0.92	<input checked="" type="checkbox"/> Satisfactorio	<input type="checkbox"/> Pequeñas modificaciones	<input type="checkbox"/> Rechazado
Usabilidad	0.88	<input type="checkbox"/> Aceptable	<input type="checkbox"/> Grandes modificaciones	
Eficiencia	0.87	<input type="checkbox"/> Deficiente		
Portabilidad	0.82	<input type="checkbox"/> Inaceptable		
Calidad en Uso	0.9			
<b>TOTAL:</b>	<b>0.89</b>			

Nombre del Evaluador: Ing. Laura Silvia Vargas Pérez M.C.  
 Organización: Instituto Tecnológico de Ciudad Madero  
 Cargo: Profesor Titular de la Licenciatura en Informática e Ingeniería en Sistemas Computacionales  
 Área: Departamento de Sistemas y Computación

Salir

Figura 9 Reporte técnico final de evaluación del ambiente Visual Studio.Net, versión 2003.

**Report of Software Evaluation: Eclipse 3.1.1 - Evaluation Type: Expert, Date: Tuesday, 02-17-20...**

**MECRAD**

Type of Evaluation: Expert  
 Environment Name: Eclipse 3.1.1  
 Description: Visual Environment used for development Applications

Features	Average	Classification Level	Criterion	Conclusions
Functionality	0.96	<input checked="" type="checkbox"/> Excellent	<input checked="" type="checkbox"/> Without Modification	<input checked="" type="checkbox"/> Accepted
Reliability	0.96	<input type="checkbox"/> Satisfactory	<input type="checkbox"/> Little Modifications	<input type="checkbox"/> Rejected
Usability	0.93	<input type="checkbox"/> Acceptable	<input type="checkbox"/> Big Modifications	
Efficiency	0.91	<input type="checkbox"/> Deficient		
Portability	0.97	<input type="checkbox"/> Unacceptable		
Quality in Use	0.82			
<b>TOTAL:</b>	<b>0.93</b>			

Evaluator Name: Ing. Jorge Peralta Escobar M.S.I.  
 Organization: Technological Institute of Madero City Autonomous Tamaulipas University  
 Position: Computer Science Professor  
 Area: Department of Computer Science

Exit

Figura 10 Reporte técnico final de evaluación de sistema del ambiente Eclipse (posgrado).

**Report of Software Evaluation: Netbeans 8.0 - Evaluation Type: Expert, Date: Tuesday, 10-21-2014**

**MECRAD**

Type of Evaluation: Expert  
 Environment Name: Netbeans 8.0  
 Description: Visual Environment used for development Applications  
 Date on which was the evaluation: Tuesday, 10-21-2014

Features	Average	Classification Level	Criterion	Conclusions
Functionality	0.94	<input checked="" type="checkbox"/> Excellent	<input checked="" type="checkbox"/> Without Modification	<input checked="" type="checkbox"/> Accepted
Reliability	0.94	<input type="checkbox"/> Satisfactory	<input type="checkbox"/> Little Modifications	<input type="checkbox"/> Rejected
Usability	0.95	<input type="checkbox"/> Acceptable	<input type="checkbox"/> Big Modifications	
Efficiency	0.84	<input type="checkbox"/> Deficient		
Portability	0.94	<input type="checkbox"/> Unacceptable		
Quality in Use	0.87			
<b>TOTAL:</b>	<b>0.91</b>			

Evaluator Name: José Agustín Hoz Ruiz y Jessica Solís Franco  
 Organization: Technological Institute of Madero City  
 Position: Students  
 Area: Department of Computer Science

Exit

Figura 11 Reporte técnico final de evaluación de sistema, estudiante posgrado.

Report of Software Evaluation: NetBeans 6.1 Evaluation Type: Expert. Date: Thursday, 05-28-2009

**MECRAD**

Type of Evaluation: Expert  
 Environment Name: NetBeans 6.1  
 Description: Ambiente de Desarrollo de Aplicaciones  
 Date on which was the evaluation: Thursday, 05-28-2009

Features	Average	Classification Level	Criterion	Conclusions
Functionality	0.90	<input type="checkbox"/> Excellent	<input checked="" type="checkbox"/> Without Modification	<input checked="" type="checkbox"/> Accepted
Reliability	0.90	<input checked="" type="checkbox"/> Satisfactory	<input type="checkbox"/> Little Modifications	<input type="checkbox"/> Rejected
Usability	0.80	<input type="checkbox"/> Acceptable	<input type="checkbox"/> Big Modifications	
Efficiency	0.80	<input type="checkbox"/> Deficient		
Portability	0.80	<input type="checkbox"/> Unacceptable		
Quality in Use	0.80			
TOTAL:		<b>0.83</b>		

Evaluator Name: Hector Rodrigo Ramirez Sanchez  
 Organization: ITCM  
 Position: Estudiante  
 Area: Dpto. Sistemas y Computación

Exit

Figura 12 Reporte técnico final de evaluación del sistema, estudiante del ISC.

Se realizaron diez pruebas para los ambientes visuales estudiados. Seis de ellos se realizaron por usuarios expertos (maestros y alumnos del posgrado del ITCM) y cuatro por principiantes (alumnos de ingeniería en sistemas computacionales del ITCM). Las evaluaciones las realizaron los alumnos de la licenciatura de Ingeniería en Sistemas Computacionales (usuarios inexpertos), profesores y alumnos del posgrado de la Maestría en Ciencias de la Computación (usuarios expertos).

Cuando se obtienen los valores respectivos de la evaluación del *software* elegido, se genera el reporte final de la evaluación, en el que se plasman los resultados definitivos y el porcentaje de cumplimiento. A su vez, se proporciona un esquema donde se muestran los puntos donde el *software* obtiene un buen nivel de calificación de calidad, con qué criterio lo alcanza y además se brinda una recomendación final acerca de su aceptación o rechazo.

#### 4. Discusión

Este proyecto se encuentra terminado en sus primeras fases, que cubre el modelo completo y su metodología para la evaluación técnica de la calidad de las herramientas de desarrollo de aplicaciones rápidas para generar sistemas de información de calidad y con sustentabilidad. Se han desarrollado los primeros prototipos del software, que es la herramienta operando en máquinas de escritorio

PC; en esta propuesta, ahora se está trabajando para que opere en dispositivos móviles.

De acuerdo con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los ambientes de desarrollo integrado (IDE) y sus herramientas RAD, seleccionados como casos de estudio, se llegó a las conclusiones que se presentan a continuación:

El Visual Studio.Net (Microsoft, 2006) obtuvo una evaluación general promedio de 0.89 (89%) entre los usuarios principiantes y un puntaje de 0.88 (88%) entre los expertos, dentro del rango de valores propuesto, por lo que el nivel de clasificación de calidad alcanzado es satisfactorio sin recomendaciones, ya que no requiere de modificaciones en su diseño -sólo actualizaciones- y por lo tanto es aceptado ampliamente. Vale la pena comentar que una de sus mayores debilidades se ubica en la característica de portabilidad, lo cual es comprensible dada su dependencia de la plataforma Windows de Microsoft (figura 9).

Eclipse (Eclipse Foundation, 2005) y Net Beans (Sun Microsystems, 2004-2010) obtuvieron una evaluación general promedio de 0.91 (91%) y 0.93 (93%), respectivamente, entre los usuarios expertos que lo evaluaron (figuras 10 y 11). Y el dictamen del informe del Reporte técnico final define que el nivel de clasificación de calidad alcanzado es excelente, sin recomendaciones, en ambos casos, ya que no requiere de modificaciones en su diseño (sólo actualizaciones) por lo que se recomienda ampliamente; aunque se puede comentar que se podría pensar que su mayor debilidad se ubica en su calidad en uso, dado que para la utilización de ambos es requisito indispensable el dominio del lenguaje Java, pero como se evalúan las herramientas RAD, no influye en el resultado.

Esta herramienta le permitirá al usuario final que realiza las pruebas, conocer los dictámenes de la calidad en uso que le ofrecen las diferentes herramientas RAD de cada plataforma comercial (IDE), en sus diversas versiones, para que tome la decisión de que IDE y que herramientas le convendrá utilizar para desarrollar sus aplicaciones informáticas diversas; el usuario podrá seleccionar las que considere convenientes para generar sus sistemas de información, con base en su calidad en uso, su utilidad, experiencia y otros factores.

## **5. Conclusiones**

La tecnología móvil es la más utilizada por los estudiantes, debido a su bajo costo, facilidad de uso, una gama amplia de aplicaciones que puede obtener gratuitamente de internet, etc. Es por esto que se genera esta aplicación para que pueda operar, también, en dispositivos móviles (celulares y tabletas), así como en la internet, y en la modalidad monousuario.

El modelo y la metodología propuesta tiene cuatro niveles de calidad, donde el último son las medidas-métricas (que fueron creadas específicamente para este modelo), en las cuales se definen los cálculos de la calidad en uso de cada una de las herramientas RAD, de acuerdo a sus características más genéricas, que conforman al IDE en proceso de evaluación, para generar cualquier aplicación en los sistemas de información a crear, y eligiendo a las mejores, dentro del IDE's de mayor calidad, de aumentará la posibilidad de generar los sistemas de información y sus aplicaciones de mayor calidad.

Debido a la similitud de los resultados de la evaluación técnica, en las plataformas utilizadas como casos de estudio, para decidir cuál seleccionar, se deben tomar en cuenta otros criterios, también importantes, como son los costos, la posibilidad de interacción con otros sistemas, la posible inserción en la plataforma en la que se van a desarrollar los sistemas, etc.

Como trabajo futuro se recomienda hacer revisiones periódicas al modelo y a la metodología para su actualización, seguir estudiando las herramientas de desarrollo de aplicaciones rápidas, para incorporar otras al modelo de evaluación, sustituir las que hayan evolucionado y que ya no sean del mismo tipo de herramientas que generen aplicaciones rápidas para los sistemas de información. donde las métricas se pueden ir adaptando para nuevas herramientas RAD y para nuevas características que vayan surgiendo dentro de los IDE's, que también están evolucionando con mucha rapidez en el mercado (las libres y de licencia). Se puede instalar en ambientes multiusuario (producto terminado de software), en un ambiente WEB (arquitectura cliente servidor), y realizar las pruebas pertinentes de cada caso. Funciona perfectamente en cualquier dispositivo móvil (tabletas, celulares), así como tratar de introducir el modelo de evaluación técnica de las



herramientas de desarrollo de aplicaciones en los ambientes visuales de los sitios *web* y en ambientes de otro tipo.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] T. Cochea, Métrica de Calidad de los sistemas de información – aplicación en la certificación de calidad de un Sistema de una empresa del sector hidrocarburífero. 2009. Artículos de Tesis de Grado. ICM, Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- [2] Eclipse Foundation. <http://www.eclipse.org>.
- [3] Gutiérrez, Modelo de evaluación para el aseguramiento de la calidad del Software, Modelo MECA. 2003. Instituto Politécnico Nacional. México.
- [4] Human Factors Research Group. SUMI: Software Usability Measurement Inventory, European Directive on Minimum Health and Safety Requirements for Work with Display Screen Equipment. Londres: Taylor & Francis Ltd. (2000).
- [5] IEEE. Software Engineering Standards Collection. Standard Glossary of Software Engineering Terminology. IEEE, Std 610. 1994. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Estados Unidos de América.
- [6] IEEE. Software Quality Metrics Methodology. IEEE 1061 Standard for a Software Quality Metrics Methodology. 1992. Institute of Electrical and Electronics Engineers. Estados Unidos de América.
- [7] ISO. ISO/IEC 9126. Software Product Evaluation – Part 2: External metrics. Part 4: Quality in use metrics--. International Organization for Standardization. Suiza. 1997.
- [8] ISO. ISO/IEC 14598. Information technology -- Software product evaluation – Part 4: Process for evaluators, Part 5: Process for acquirers. International Organization for Standardization. Suiza. (1998).
- [9] ISO. ISO 9241-151. Ergonomics of human-system interaction -- Part 151: Guidance on World Wide Web user interfaces and industry standards for user centered design. International Organization for Standardization. (2008). Suiza.



- [10] ISO. *ISO/IEC 25000 Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)—Guide to SQuaRE*. International Organization for Standardization. (2005). Suiza.
- [11] Microsoft. *Visual Studio.Net 2003. Entorno de Desarrollo Integrado IDE para sistemas operativos Windows. Versión 7.1*. <https://www.visualstudio.com/es-es/visual-studio-homepage-vs.aspx>.
- [12] M. Moreno. “Aplicación de las Métricas de Calidad del Software en la Evaluación Objetiva de Gramáticas Independientes de Contexto Inferidas”. I Simposio Avances en Gestión de Proyectos y Calidad del Software. Universidad de Salamanca. 2004. Pp. 209-220.
- [13] L. Olsina, “Medición y Evaluación de Calidad en Uso: Un Caso de Estudio para una Aplicación E-Learning”. 9º Taller Iberoamericano de Ingeniería de Requisitos y Ambientes de Software. La Plata: Centro Latinoamericano de Estudios en Informática. 2006. Pp. 317-33.
- [14] M. Piattini, “Métricas para la Evaluación de Modelos de Proceso de Negocio”. 9º Taller Iberoamericano de Ingeniería de Requisitos y Ambientes de Software. 2006. Pp. 419-432.
- [15] R. Pressman, *Ingeniería de Software. Un enfoque práctico*. Séptima Edición. 2010. McGraw Hill/Interamericana. Madrid, España.
- [16] Sun Microsystems *NetBeans Entorno de Desarrollo Integrado IDE libre de código abierto. Versión 3.6., Versión 8.0*. Sun Microsystems / Oracle Corporation. <https://netbeans.org/>.
- [17] L. S. Vargas-Pérez, A. F. Gutiérrez-Tornés, E. M. Felipe-Riverón, “MECRAD: Model and Tool for the Technical Quality Evaluation of Software Products in Visual Environment”. 3rd International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology. 2008. Pp. 107-112.
- [18] L. S. Vargas-Pérez, A. F. Gutiérrez-Tornés, E. M. Felipe-Riverón. *Sistema para evaluar herramientas RAD*. Registro ante SEP INDAUTOR con número de registro público 03-2012-100211292400-01. 2012. Ciudad de México, México.

## **7. Autores**

M.C. Laura Silvia Vargas Pérez, Ingeniera Electrónica, Maestra en Ciencias en Computación Electrónica por el Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional.

Dr. Agustín Francisco Gutiérrez Tornés, Doctor en Ciencias PhD por la Universidad de Varsovia, Polonia.

Dr. Edgardo Manuel Felipe Riverón, PhD por el Instituto de Investigación en Computación y Automatización de la Universidad de Budapest, Hungría.

Dra. Ana María Soto Hernández, Maestra en Ciencias en Matemática Educativa por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Doctora en Educación por la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Dr. Carlos Eduardo Uc Ríos, Doctor en Ciencias del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

M.S.I. Jorge Peralta Escobar, Maestro en Sistemas de Información por la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

M.A.I. Vanessa Atenea Vargas Pérez, Maestra en Administración Industrial por la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Maestra en Finanzas y Economía Internacional por la Universidad de Barcelona, España.

# ANIMACIÓN DE UN MODELO 3D DEL ROBOT DARWIN- OP UTILIZANDO KINECT

***Antonio Benítez Ruiz***

Universidad Politécnica de Puebla, Departamento de Posgrado  
*antonio.benitez@uppuebla.edu.mx*

***María Auxilio Medina Nieto***

Universidad Politécnica de Puebla, Departamento de Posgrado  
*maria.medina@uppuebla.edu.mx*

***Miguel Ángel Medina Nieto***

Universidad Politécnica de Puebla, Departamento de Posgrado  
*miguel.medina@uppuebla.edu.mx*

***Jorge de la Calleja Mora***

Universidad Politécnica de Puebla, Departamento de Posgrado  
*Jorge.delacalleja@uppuebla.edu.mx*

## **Resumen**

Este documento describe herramientas relacionadas con la creación de video juegos, principalmente aquellas que soportan tareas como diseño y animación, con el propósito de integrar una representación gráfica en tres dimensiones del robot humanoide Darwin-OP. El objetivo se logra al animar esta representación mediante la incorporación de un esqueleto y el establecimiento de una conexión con el sensor movimientos de un Kinect. Los resultados iniciales de esta investigación de tipo exploratoria, muestran la factibilidad de animar articulaciones específicas de un personaje virtual a través de un dispositivo relativamente accesible.

**Palabra(s) clave(s):** Captura de movimiento, diseño 3D, kinect, motores de videojuegos.

## 1. Introducción

Los motores de creación de video juegos se han utilizado para simulación, animación, inmersión, realidad aumentada, interfaces humano computadora, entre otras. Éstos apoyan el desarrollo casi transparente de una diversidad de aplicaciones, por ejemplo, que se ejecutan en computadoras personales (PCs), dispositivos móviles o en consolas como Xbox, Play Station, PS Vita, Windows Phone, Windows Store Apps o Blackberry, mismas que emplean diferentes sistemas operativos. En la creación de video juegos, es frecuente la incorporación de otro tipo de hardware como giróscopos, sensores GPS, Microsoft Kinect y Oculus VR.

Los motores de video juegos son las herramientas de software que están detrás de muchos videos juegos que se encuentran en el mercado [1]. La evolución de la tecnología en las computadoras, entre otros factores, ha permitido que la industria de los videos juegos sea reconocida ampliamente por sus logros tecnológicos y financieros. Es en esta industria donde existe una demanda creciente de recursos humanos especializados que desempeñen roles como programador, diseñador de juego, ingeniero mecánico, diseñador de niveles, diseñador de personajes, diseñador de animación, escritor o diseñador de sonido [3]. De manera informal, en el vocabulario común del desarrollo de videojuegos, a los diseñadores se les conoce como artistas.

El desarrollo de un video juego requiere integrar a un conjunto de elementos como los siguientes: la historia o temática del juego (*"game design"*), la forma o estilo de interacción con los usuarios (*"game play"*); el contenido del juego (*"game content"*), que generalmente es construido por los artistas o el diseño de la interacción del contenido en tiempo de ejecución; son los programadores quienes desarrollan la aplicación que cargará el contenido y quienes integran aspectos relacionados con Inteligencia Artificial (*"game AI"*), utilizando un motor de video juegos (*"game engine"*), el cual se encarga de administrar y desplegar la información en el mundo virtual [2].

Este documento describe motores de video juegos y herramientas relacionadas con la creación de video juegos, principalmente aquellas que soportan tareas

como diseño y animación, con el propósito de integrar una representación gráfica en tres dimensiones (3D) de un robot humanoide Darwin-OP.

El documento está organizado de la manera siguiente. La sección 2 describe características básicas que se utilizan para seleccionar un motor de video juegos. La sección 3 presenta herramientas de generación de contenido. La sección 4 contiene el modelo del robot Darwin-OP. La conexión entre la interfaz de Unity con el sensor de Kinect se trata en la sección 5. Los resultados relacionados con la animación del modelo se incluyen en la sección 6. Finalmente, las conclusiones y el trabajo en proceso se presentan en la sección 7.

## **2. Motores para el desarrollo de videojuegos**

Actualmente, existen motores para desarrollar video juegos que se distribuyen bajo licencias “*free ware*”, de código abierto o con costos que pudieran absorber organizaciones no muy grandes [4]. Esta sección describe las características y funcionalidades de algunos.

El motor de juegos Unity es uno de los más utilizados, los tipos de usuarios varían de desarrolladores novatos hasta estudios profesionales [1] y [8]. Unity pertenece a la empresa Unity Technologies, cuenta con una versión gratuita y una de paga. Los juegos se pueden desarrollarse tanto en 3D como en 2D, para plataformas como Windows, Mac y Linux. Entre las plataformas para ejecutar los juegos está la web (mediante el “plug-in Unity Web Player”), las PC, dispositivos móviles y consolas de videojuegos como Xbox, PS3 o PS4.

Algunos de los video juegos que se han desarrollado con este motor son: “Assassin’s Creed Identity”, “Temple Run”, “Game of Thrones: Seven Kingdoms”, “République”, “Hearthstone: Heroes of Warcraft” [1].

La interfaz de desarrollo de Unity es relativamente fácil de utilizar. La figura 1 de la izquierda muestra una parte. Dado que la comunidad de desarrolladores es grande, los usuarios se apoyan en la documentación disponible y en los foros de ayuda.

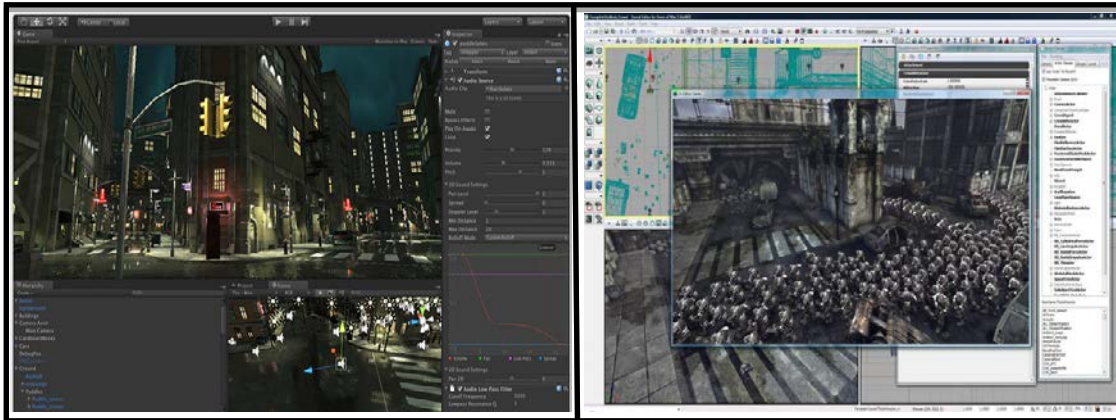


Figura 1 Ejemplos de la interfaz de desarrollo de *Unity* (izquierda) y *Unreal* (derecha).

El motor Unreal representa un conjunto de herramientas (o “suite”) de desarrollo de video juegos [9]. Pertenece a la empresa Epic Games; es propietaria de los video juegos “Gears of War”, “Haunted House: Cryptic Graves”, “Tekken 7” y “Kingdom Hearts III”. Los juegos desarrollados con esta herramienta se ejecutan en PC, consolas de videojuegos y dispositivos móviles.

Unreal ofrece una versión gratuita para uso académico que utiliza Windows como sistema operativo. La figura 1 de la derecha muestra parte de su interfaz. La experiencia en el uso de Unity y Unreal nos permite comentar que el desarrollo con el último es más complejo, sin embargo, sus herramientas tienen más capacidades. La documentación técnica, foros y tutoriales están disponibles en la web.

CryEngine es el motor de juegos de la empresa Crytek [10]; está orientado para desarrollar juegos que se ejecuten en consolas, la calidad gráfica puede ser superior a la obtenida con los dos motores previos. Los desarrolladores independientes pueden utilizar este motor sin costo. La figura 2 de la izquierda muestra un ejemplo de la interfaz para crear escenarios. “La saga de Crysis”, “Enemy Front”, “Warface”, “State of Decay” y “Sonic Boom” son ejemplos de juegos desarrollados con CryEngine. La documentación es extensa y cuenta con foros oficiales para desarrolladores.

Otro motor que ha ganado popularidad es Game Maker Studio [11]. Pertenece a la empresa Yoyo Games; se ejecuta tanto en computadoras con el sistema operativo

Windows o iOS. Los juegos se ejecutan en plataformas móviles, PC, Mac, Linux, PS4 y Xbox. La figura 2 derecha muestra parte de su interfaz. Entre los juegos populares desarrollados con este motor están “Chain Braker”, “Uncanny Valley”, “Terrain Saga: KR-17” y “Arcane Soul”.

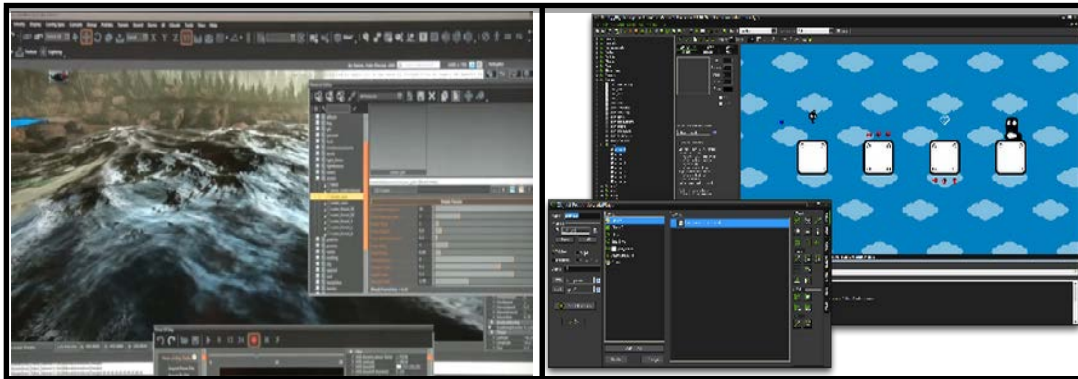


Figura 2 Interfaz de desarrollo de *CryEngine* (izquierda) y *Game Maker Studio* (derecha).

La decisión para escoger el mejor motor de juegos depende de muchos factores, aunque principalmente depende de qué se desea desarrollar y en dónde se publicará el juego. Cada motor tiene sus ventajas y limitaciones respecto a los otros. Como recomendación, se deberá tener cuidado en seleccionar aquel motor que tenga la suficiente documentación y verificar la cantidad de personas que está trabajando con él, sin descartar características internas como motor física, iluminación, manejo de shaders, manejo de sombras, animación, entre otros.

La tabla 1 muestra los nombres, la empresa y las direcciones de las páginas electrónicas principales de otros motores, se incluyen también las de los descritos.

### 3. Herramientas para generar contenido

Los motores de video juegos, en términos de producción, son ensambladores, eso es, casi todos los recursos (“assets”) se desarrollan utilizando otras herramientas y después se importan para crear el juego en sí. Por ejemplo, los modelos 3D se crean en aplicaciones como Maya [3],[12], Cinema4D [15], Blender [14], Modo, 3DS Max [13], Lightwave, Daz Studio, ZBrush [16] o Mudbox [21]; las texturas en Photoshop, Gimp [17] o Body Paint; los scripts de programación se

elaboran en Visual Studio, Mono Develop, UniSCTE o Unitron [3]; para el ambiente y diseño de un terreno, se suele usar Grome, Graphisoft ArchiCAD, SketchUp o Revit [5]. Las animaciones de los “assets” se definen en herramientas como Motion Builder o iPisoft Mocap Studio; incluso los sonidos también se importan. En esta sección se describen algunas de las herramientas utilizadas para implementar “assets”, los cuales se consideran elementos esenciales del contenido del juego.

Tabla 1 Nombres y páginas principales de motores de desarrollo de video juegos.

Nombre del motor	Empresa	Dirección electrónica de la página principal
Cocos2DX	Cocos2d-x Developer Blog	<a href="http://www.cocos2d-x.org">www.cocos2d-x.org</a>
CryEngine	Crytek GmbH.	<a href="http://www.cryengine.com">www.cryengine.com</a>
Game Maker Studio	Yoyo games	<a href="http://www.yoyogames.com/gamemaker">www.yoyogames.com/gamemaker</a>
Gamebryo	Gamebase Co., Ltd.	<a href="http://www.gamebryo.com">www.gamebryo.com</a>
Leadwerks	Leadwerks Software	<a href="http://www.leadwerks.com">www.leadwerks.com</a>
Panda3D	Carnegie Mellon University	<a href="http://www.panda3d.org">www.panda3d.org</a>
Steam (antes Source)	Valve Corporation	<a href="http://www.valvesoftware.com">www.valvesoftware.com</a>
Stencyl	Stencyl, LLC	<a href="http://www.stencyl.com">www.stencyl.com</a>
Tombstone engine (antes C4 Engine)	Terathon Software	<a href="http://www.terathon.com">http://www.terathon.com</a>
Torque	Garage Games	<a href="http://www.garagegames.com">www.garagegames.com</a>
Unity	Unity Technologies	<a href="http://unity3d.com">unity3d.com</a>
Unreal Engine 4	EPIC GAMES, INC.	<a href="http://www.unrealengine.com">www.unrealengine.com</a>

El modelado de objetos en 3D, generalmente se realiza seleccionando uno de dos enfoques: construir o esculpir el modelo. Una de las herramientas con mayor capacidad para el primer enfoque es Maya [3], [12]. La manipulación de cámaras y de objetos se realiza con los mismos atajos que Unity. En Maya, se animan personajes que después pueden exportarse a Unity de manera sencilla. La figura 3 de la izquierda presenta un ejemplo de la interfaz en Maya.

Otra herramienta para diseño, construcción de modelos en 3D y animación es Autodesk 3DS Max; la cual emplea “*plug ins*”. Con frecuencia, se le relaciona más con su uso en arquitectura que con el desarrollo de video juegos [13]. La figura 3 derecha muestra parte de su interfaz.



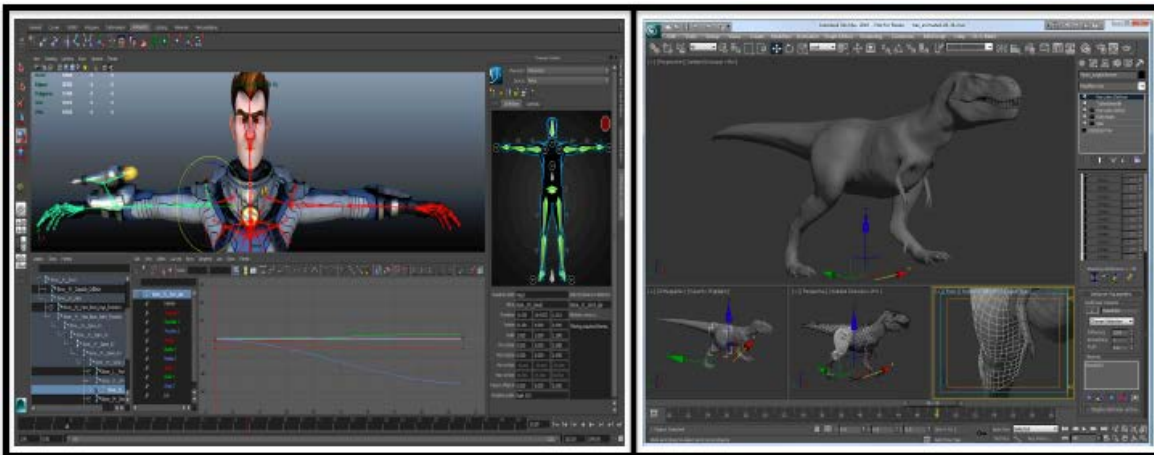


Figura 3 Ejemplos de la interfaz de desarrollo de *Maya* (izquierda) y *3DS Max* (derecha).

Blender, a pesar de distribuirse de forma gratuita, es una herramienta potente para modelar objetos en 3D [14], implementa el enfoque de construcción. Se utiliza en sistemas Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, FreeBSD e IRIZ. Incluye un motor de video juegos relativamente sencillo. La figura 4 de la izquierda muestra su interfaz.



Figura 4 Interfaz de desarrollo de *Blender* (izquierda) y *Cinema4D* (derecha).

Una herramienta con mayor capacidad para crear modelos 3D es Cinema 4D [15]. Entre sus características destacan la creación de “rigs” y animaciones avanzadas de personajes y la incorporación de efectos en 3D como pelo (ver la figura 4 de la derecha).

Aun cuando las herramientas presentadas en esta sección permiten pintar objetos y definir tipos de materiales, es común incrementar la calidad del texturizado mediante la creación de mapas UV y el uso de Photoshop o Gimp. La figura 5 muestra un ejemplo del manejo de texturas en Photoshop.



Figura 5 Mapa UV de un personaje editado en Photoshop.

Las herramientas de escultura, es decir, aquellas que implementan el segundo enfoque, no agregan objetos a un modelo, sino que a partir de un bloque 3D general, éste se esculpe. De las ventajas del segundo enfoque resalta el detalle en polígonos que se puede obtener. En el desarrollo profesional de video juegos, la literatura indica que las herramientas de escultura se emplean para modelar objetos 3D de alta calidad, es decir, aquellos que emplean varios millones de polígonos, éstos se exportan como modelos de sólo miles y gracias a mapas normales, de profundidad, de luces, entre otros, conservan su calidad.

Otra característica de las herramientas de escultura es que las técnicas de texturizado de los modelos 3D esculpidos son más intuitivas que las de los modelos hechos con herramientas de creación. Una de las herramientas de escultura más utilizadas es Zbrush, de la empresa Pixologic [16]. Es un software de escultura, pintura digital y modelado en 3D. Permite esculpir modelos detallados de un modo semejante a pintar en los mismos. Zbrush ha sido utilizado para modelar personajes de películas como *Underworld* o *El señor de los anillos*. La figura 6 de la izquierda muestra la interfaz de Zbrush. Un competidor directo de ZBrush es Autodesk Mudbox [21], (los modelos hechos en la primera versión se utilizaron en la película de King Kong. Mudbox cuenta con un ambiente 3D para

incorporar cámaras móviles, edición de mallas poligonales y subdivisión de objetos. Permite el uso de capas 3D para visualizaciones rápidas del diseño, escultura no destructiva y soporte para un número de polígonos grande (figura 6 derecha).

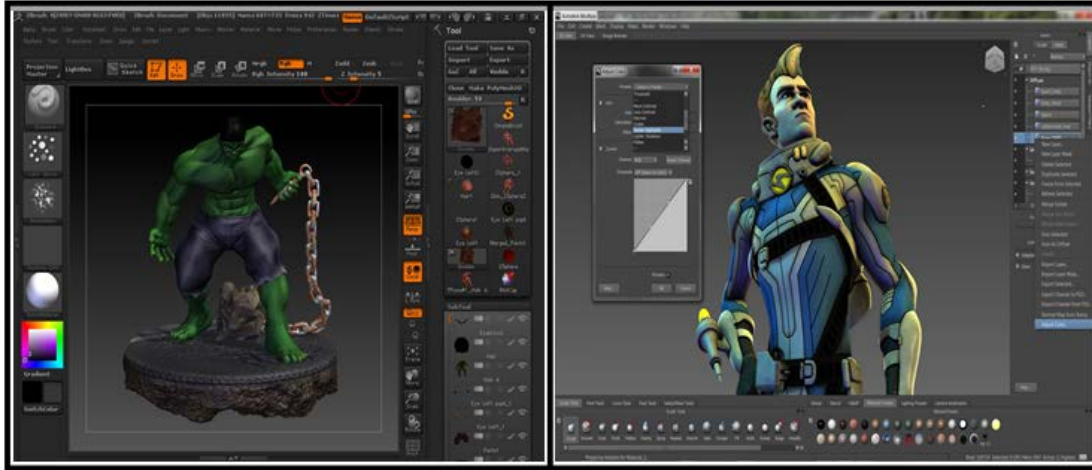


Figura 6 Interfaz de desarrollo de *Zbrush* (izquierda) y *Mudbox* (derecha).

Después de presentar algunas herramientas para desarrollar “assets”, la sección 4 explica el proceso de construcción del modelo del robot Darwin-OP.

#### 4. Modelado del robot Darwin-OP en Maya

El modelo 3D del robot Darwin-OP requirió de la integración de las piezas disponibles en formato STL obtenidas desde el sitio web [20]; estas piezas se importaron en Maya y se integraron mediante manipulación simple y operaciones de escala, traslación y rotación. La Figura 7 muestra el conjunto de piezas que forman el modelo del robot. Tanto el robot original (el físico), como el modelo, tiene 20 articulaciones asociadas a las piernas, brazos y cuello. Los pasos realizados en el modelado del robot son:

- Paso 1: *creación de materiales*. - Se crearon materiales nuevos para las piezas del robot, con el propósito de colorear el modelo y que éste sea lo más fiel posible al robot original (ver la figura 7).

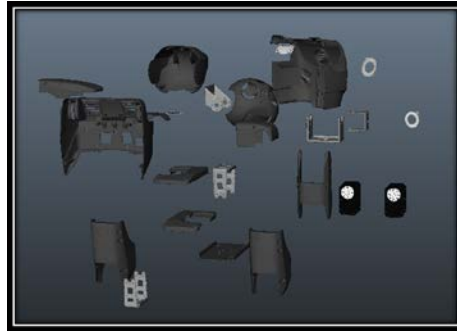


Figura 7 Piezas del robot Darwin OP importadas en Maya.

- **Paso 2:** *aplicación de escala.* - La manipulación de las piezas requirió de la especificación de una escala común para armar el modelo.
- **Paso 3:** *definición de jerarquía entre piezas.* - Una vez armado el modelo, se definió la jerarquía entre las diferentes piezas, la cual consiste en asociar conjuntos de partes del robot como piernas y brazos para unirlos entre sí, definiendo cadenas cinemáticas [7]. Esta asociación permite que el modelo se pueda animar o dotar de movimiento. La figura 8 muestra las piezas utilizadas para una pierna, el color verde se emplea para resaltar cómo se realizó la asociación.

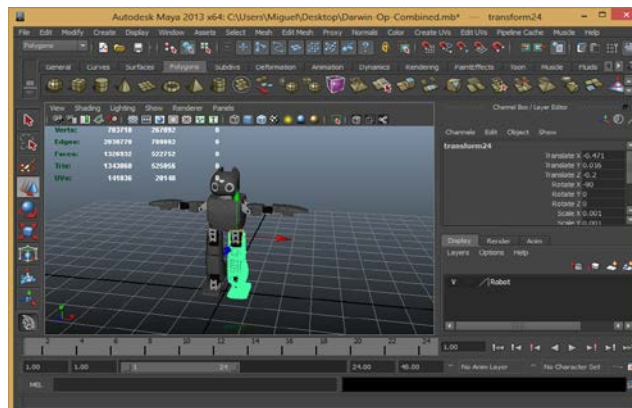


Figura 8 Asociación de piezas para la pierna del robot Darwin OP en Maya.

- **Paso 4:** *Definición de articulaciones.* Una de las tareas más importantes en el proceso de animación, consiste en definir la posición de las articulaciones que se asocian al modelo. En este caso, las articulaciones se representan en el modelo por motores y corresponden a elementos del robot como rodillas, codos o muñecas.

- Paso 5: Asignación de rangos de movilidad para las articulaciones. - Además de definir la posición de las articulaciones, se requiere establecer rangos de movilidad (o restricciones) de la parte del cuerpo que se desea animar, con el propósito de evitar daños en el robot original al intentar ejecutar un movimiento considerado como no permitido. La Figura 9 muestra una articulación y su rango de movilidad [7]. Los rangos se ajustan a cada uno de los ejes cartesianos en un espacio tridimensional (x, y, z).

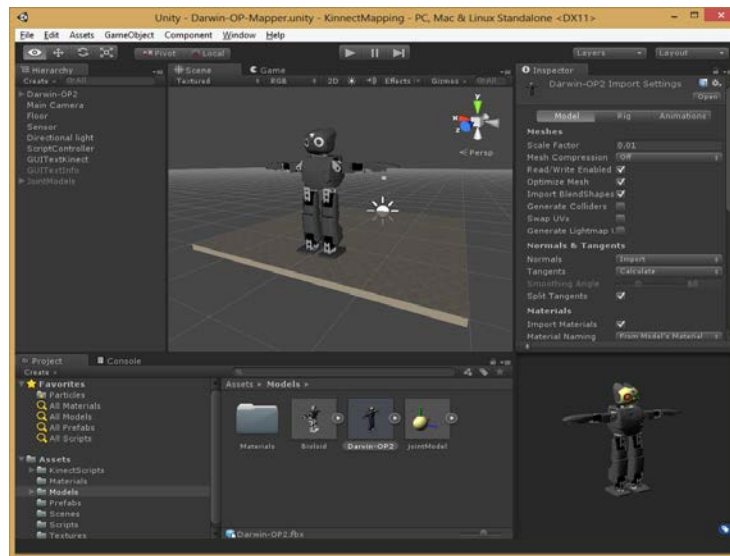


Figura 9 Modelo en 3D del robot Darwin OP importado en Unity.

- Paso 6: Exportación del modelo.- Una vez definidas las articulaciones y sus rangos de movilidad, el modelo resultante se exporta en formato FBX y se importa en Unity, con la intención de establecer una conexión entre el modelo y el dispositivo Kinect. Se requiere crear una escena para incorporar al modelo (ver la figura 9). La conexión entre la interfaz de Unity con el sensor de Kinect se trata en la segunda parte de la sección 5.

## 5. Integración de MS Kinect en Unity

Desde su concepción, Kinect ha revolucionado el campo de las interfaces naturales, en inglés “*Natural User Interface*” (NUI), así como el diseño de video juegos cuya interacción no requiere de utilizar las manos. Dado que la interacción

con Kinect se realiza con gestos y voz, sus aplicaciones se han extendido en áreas como cuidado de la salud, robótica, procesamiento de imágenes, seguridad o educación [6].

Kinect es un dispositivo de captura de movimiento, lo cual implica que utiliza métodos de procesamiento de imágenes y su digitalización para detectar la posición de las articulaciones de las personas con el propósito de interactuar con sistemas de software [19]. A pesar de que el lanzamiento de Kinect para Xbox fue en noviembre de 2010, no fue sino hasta junio de 2011 cuando Microsoft liberó la versión beta del SDK<sup>1</sup> [18]. Esto permitió que los desarrolladores pudieran tener acceso al sensor a través de librerías y APIs<sup>2</sup> para implementar aplicaciones de software utilizando al sensor como una interfaz multimodal.

La organización OpenNI fue de las primeras en crear una conexión entre los motores de video juegos y Kinect. Posteriormente, a partir de la versión 1.7 del SDK y la versión 4.5.2 de Unity, se pueden encontrar diferentes “*plug ins*”. La conexión que se reporta en este documento utiliza dichas versiones. Los pasos realizados para establecer la conexión entre el modelo del robot y Kinect son:

- Paso 1: Animación del modelo. - En Unity, se busca en su Asset Store y se seleccionó el “*plug in*” “Kinect with MS-SDK” de RF Solutions. Este elemento carga automáticamente las librerías disponibles del SDK de Kinect para que pueda controlarse desde Unity; contiene scripts de ejemplos y se distribuye de forma gratuita.
- Paso 2: Mapeo de articulaciones. - El sensor de Kinect identifica la posición de hasta 20 articulaciones de dos jugadores. Dado que las articulaciones del robot no son las mismas que las articulaciones de una persona y que los rangos de movilidad son también distintos, se hizo un mapeo entre las articulaciones del Kinect y las del robot. La Figura 10 muestra en color naranja las articulaciones reconocidas por el sensor, el lado derecho contiene las asociadas al robot. En la figura 11 se observa cómo se asocian las articulaciones del cuerpo humano a las articulaciones del robot.

---

<sup>1</sup> SDK son las siglas de “Software Development Kit”, herramienta de desarrollo de software.

<sup>2</sup> API son las siglas en inglés de “Application Programming Interface”, interfaz de programación de aplicaciones



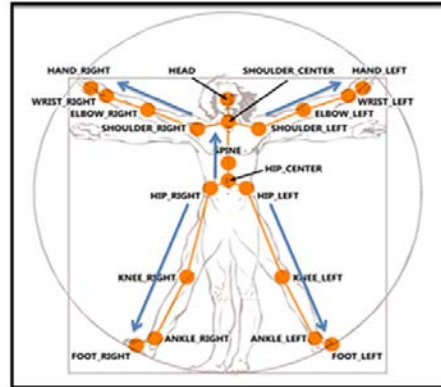


Figura 10 Articulaciones identificadas por el sensor del Kinect.

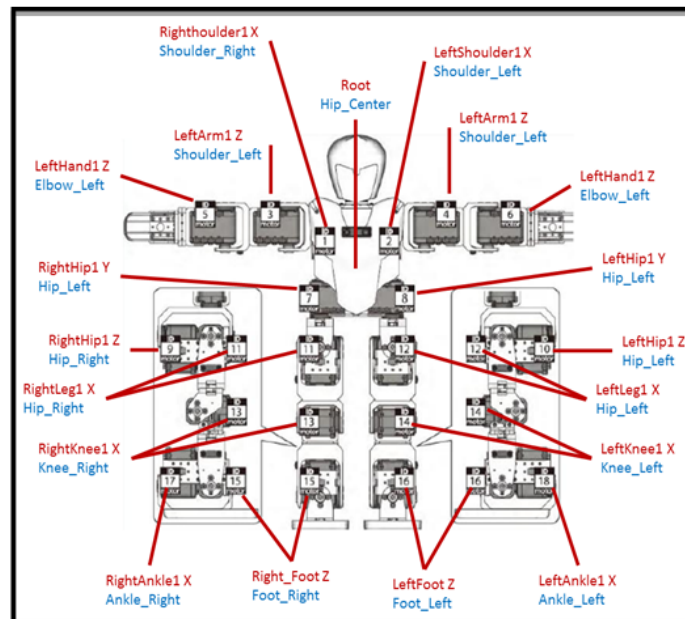


Figura 11 Articulaciones identificadas modelo 3D del robot Darwin OP importado en Unity.

- Paso 3: Implementación de scripts. Después del mapeo, se modifican los scripts de ejemplo para mover las articulaciones del modelo 3D del robot con base en la captura de movimientos del usuario. Los resultados preliminares se incluyen en la sección 6.

## 6. Resultados

Los resultados del modelado del robot Darwin OP se organizan en dos grupos: los relacionados con la funcionalidad y los relacionados con el diseño y

conectividad. Con respecto a la funcionalidad, el modelo se asoció a través de un mapeo con las 20 articulaciones del cuerpo humano que detecta el sensor de Kinect, (ver paso 2 de la sección 5). A través de un conjunto de pruebas y observaciones directas, se verificó la reacción correcta del modelo a los movimientos del usuario. La figura 12 de la izquierda muestra la posición de inicio del modelo en Unity, a partir de la cual se puede iniciar la animación. Del lado derecho se muestra cómo se ve el modelo cuando el usuario coloca los brazos hacia abajo.

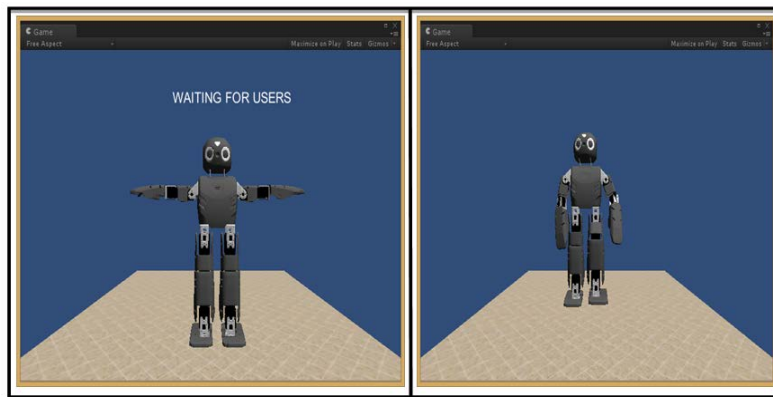


Figura 12 Posición inicial de modelo (izq.) y captura de un movimiento del usuario (der.).

De manera experimental, cuando un usuario movía el cuerpo considerando las articulaciones del modelo, se pudieron observar las limitaciones de la animación. En relación con el diseño, se tiene lo siguiente:

- Un modelo en 3D del robot Darwin OP que se integró en maya, al cual se le asociaron cadenas cinemáticas para su animación.
- La identificación de rangos de movilidad para las articulaciones asociadas al robot. En relación a la conectividad, se logró el establecimiento de una conexión del motor de videojuegos de Unity con el dispositivo de Kinect para animar el modelo del robot.

## 7. Conclusiones

Este documento describió un conjunto de herramientas utilizadas para el desarrollo de video juegos, con el propósito de utilizar algunas que permitan dotar



de animación a un modelo en 3D del robot Darwin-Op utilizando Kinect. Para ello se integraron y asociaron un conjunto de piezas que forman las cadenas cinemáticas. El modelo se integró en un escenario en Unity, en el cual se pueden analizar los valores de posición de las articulaciones y tareas como rotación y traslación.

Actualmente, el modelo 3D emplea un gran número de polígonos. Como trabajo a futuro, se propone reducir el número de polígonos para incrementar la fluidez y velocidad de ejecución del modelo, de manera que los movimientos se perciban más naturales. Se planea también la implementación en el modelo de rutinas de movimiento determinadas.

## **8. Bibliografía y Referencias**

- [1] Goldstone W, Unity 3.x Game Development Essentials. 2011. Packt Publishing.
- [2] D. H. Eberly, 3D Game Engine Design, a practical approach to real-time computer graphics. 2006. Morgan Kaufmann Publishers.
- [3] A. Watkins, Creating games with Unity and Maya. Focal Press. 2011.
- [4] Una visión de la industria de videojuegos en México. [http://www.motordejuegos.net/uploads/1/5/4/7/15475184/mdj\\_reporte2013.pdf](http://www.motordejuegos.net/uploads/1/5/4/7/15475184/mdj_reporte2013.pdf). Junio del 2016.
- [5] S. Boeykens, Unity for architectural visualization. 2013. Packt Publishing.
- [6] J. Abhijit, Kinect for Windows SDK Programming Guide. 2012. Packt Publishing.
- [7] A. Benitez, I. Huitzil, A. Casiano, J. De la Calleja, M. A. Medina, "PUMA 560: Robot prototype with graphic simulation environment". *Advances in Mechanical Engineering*. Vol 2. No. 1. ISSN: 2160-0619. 2012. Pp. 17-24.
- [8] Unreal Development Kit. <https://www.unrealengine.com/>. Junio del 2016.
- [9] CryEngine 3. <http://www.crytek.com/cryengine/cryengine3/overview>. Junio del 2016.
- [10] Game Maker Studio. <https://www.yoyogames.com/studio>. Junio del 2016.

- [11] Autodesk Maya. © 2016 Autodesk Inc. <http://www.autodesk.mx/products/3ds-max/overview> Junio del 2016.
- [12] Autodesk 3DS Max. © 2013 - 2016 YoYo Games Ltd. <https://www.yoyogames.com/studio>. Junio del 2016.
- [13] Blender. <http://www.blender.org/>. Junio del 2016.
- [14] Cinema 4D. © MAXON Computer. <http://www.maxon.net/es/products/cinema-4d-studio.html>. Junio del 2016.
- [15] ZBrush. © 2016 Pixologic, Inc. <http://pixologic.com/zbrush/features/ZBrush4R6/>. Junio del 2016.
- [16] Gimp. © 2001-2016. The GIMP Team <http://www.gimp.org/>. Junio del 2016.
- [17] Microsoft Kinect SDK 1.7. © 2016 Microsoft. <http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=36996>. Junio del 2016.
- [18] Kinect asset para Unity. <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/7747>. Junio del 2016.
- [19] Modelo 3D del robot Darwin-OP. © 2016 MakerBot ® Industries, LLC. <http://www.thingiverse.com/thing:9793>. Junio del 2016.
- [20] Autodesk Mudbox. © 2016 Autodesk Inc <http://www.autodesk.com/products/mudbox/overview>. Junio del 2016.

## **9. Autores**

El Dr. Antonio Benitez Ruiz realizó el Doctorado en Ciencias de la Computación y la Maestría en Ciencias Computacionales en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Es egresado de la Licenciatura en Computación de la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Su trabajo de investigación está relacionado con las áreas de robótica reactiva, algoritmos de planificación de movimientos, graficación por computadora e interacción humano - robot. Cuenta con reconocimiento a Perfil Deseable del PRODEP desde 2007.

La Dra. María Auxilio Medina Nieto realizó el Doctorado en Ciencias de la Computación y la Maestría en Ingeniería en Sistemas Computacionales en la Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). Es egresada de la Licenciatura en

Computación de la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). La Dra. Medina ha participado en proyectos relacionados con agentes, bibliotecas digitales, bases de datos y redes sociales; cuenta con el reconocimiento a perfil deseable de PRODEP desde 2005. Es miembro nivel candidato del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Actualmente, su investigación está dirigida a temas como web semántica, representación del conocimiento a través de ontologías, tecnologías de la información y comunicación (TICs), e interacción humano – computadora.

Dr. Jorge de la Calleja Mora realizó el Doctorado en Ciencias Computacionales y la Maestría en Ciencias Computacionales en INAOE. Es egresado de la Licenciatura en Computación de la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Cuenta con el reconocimiento a perfil deseable de PRODEP desde 2007 y es miembro nivel candidato del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Su trabajo de investigación está relacionado con las áreas de Aprendizaje Automático y Visión por Computadora. Cuenta con reconocimiento a Perfil Deseable del PRODEP desde 2007.

El Lic. Miguel Ángel Medina Nieto. Es egresado de la Licenciatura en Computación de la Facultad de Ciencias de la Computación (FCC) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Actualmente es estudiante de la Maestría en Ingeniería en Sistemas y Cómputo Inteligente en la Universidad Politécnica de Puebla. Este programa de Maestría se encuentra adscrito al PNPIC de CONACYT. Sus áreas de interés son Aprendizaje Automático y Visión por Computadora.

# **ANÁLISIS DEL PERFIL DE PERSONALIDAD UTILIZANDO EL TEST NEO-FFI Y REDES NEURONALES ARTIFICIALES**

***María de la Paz Jaén Rendón***

Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
*mpjaenr@itsm.edu.mx*

***Luis Alberto Morales Rosales***

Instituto Tecnológico Superior de Misantla  
*lamorales@itsm.edu.mx*

***Graciela Maceda Gómez***

Universidad Politécnica de Tlaxcala  
*graciela.maceda@uptlax.edu.mx*

***Ignacio Algreto Badillo***

Universidad Politécnica de Tlaxcala  
*ignacio.algreto@uptlax.edu.mx*

***Mariana Lobato Báez***

Instituto Tecnológico Superior de Libres  
*elegancia\_14@hotmail.com*

## **Resumen**

El turismo se ha convertido en un recurso importante para la economía de los países. Sin embargo, el sector turístico requiere de una gran promoción para detonar esa economía. Ofrecer destinos turísticos mediante los servicios de Internet, y en particular, redes sociales como Facebook ayudaría a detonarla. En este trabajo se presentan tres aspectos tecnológicos enfocados en ofrecer recomendaciones turísticas a los internautas de redes sociales:

- Análisis de Sentimientos, donde se reconoce una emoción expresada a través de un comentario en una red social.

- Perfilado de Autores aplicando la prueba NEO-FFI, utilizada como medida rápida y general de cinco factores de personalidad, para ofrecer un resultado automático de la prueba se presenta la caracterización de una Red Neuronal que procesará los datos con el fin de identificar los rasgos distintivos de la personalidad del internauta.
- la elaboración de una base de datos que contiene la información relevante de los lugares turísticos a recomendar dentro de una región. La prueba NEO-FFI ha sido aplicada a personas en un rango de edad de 18 a 32 años de edad, identificando como resultado que las personas en su mayoría presentan principalmente rasgos de amabilidad y responsabilidad.

**Palabra(s) Clave(s):** Cinco factores de personalidad, prueba NEO-FFI, redes neuronales artificiales.

## 1. Introducción

En las últimas décadas, el turismo se ha convertido en una actividad económica de gran importancia a nivel mundial. El continuo crecimiento del sector turístico es un fenómeno que ha contribuido a impulsar el progreso socioeconómico de muchos países, sobre todo en las regiones donde se desarrolla esta actividad, generando empleos y mejoras a las zonas visitadas.

Por lo tanto, la promoción turística debe adaptarse a los constantes cambios y avances tecnológicos para que las ventajas que éstos proporcionan sean aprovechadas de manera adecuada. En [1] se dice que entre 2014 y 2019 se tendrá un crecimiento del uso del internet a través de dispositivos móviles. Esto refleja la tendencia de que cada vez más usuarios y empresas utilizan internet para la búsqueda de información, la compra o venta de productos y servicios, publicaciones en redes sociales, entre otras. De esta manera, si se tuvieran mecanismos que permitieran generar recomendaciones turísticas a través del perfil del usuario, esto generaría productos en específico que podría consumir una persona, los cuales serían presentados en forma especializada para ella.

Las redes sociales irrumpieron con fuerza hace algunos años y cambiaron la forma de comunicarse, de comprar y hasta de elegir destinos turísticos,

convirtiéndose en un canal de comunicación *online* que cuenta con algo muy importante, tanto para personas como para empresas, brinda a sus usuarios la posibilidad de intercambiar información, compartir opiniones, emociones y sensaciones por medio de sus comentarios. La gran mayoría de estos usuarios no tienen conciencia de que a través de estos medios se analizan sus datos día a día, todo esto con la ayuda de algoritmos de ciencias computacionales. Adicionalmente, hay una gran cantidad de datos que son almacenados por la multitud de usuarios, esta base de datos inmensa puede reflejar tendencias, clasificaciones, predicciones o aprendizajes, lo cual ya se vuelve intratable con los algoritmos convencionales, requiriéndose algoritmos de Inteligencia Artificial (IA), grandes datos (*big data*) y minería de datos. En este sentido, algoritmos de IA permitirán hacer este tipo de trabajos, aunque es necesario tanto para un tipo como para el otro tipo de algoritmos, el realizar análisis y evaluaciones en el diseño y construcción de implementaciones específicas.

En específico, las Redes Neuronales Artificiales (RNA), consideradas como un pilar de la IA, intentan simular el funcionamiento del sistema nervioso humano, aprendiendo de la experiencia, generalizando de ejemplos previos a ejemplos nuevos y abstrayendo las características principales de una serie de datos. Por otro lado, hay otra área de investigación que es de gran utilidad y se denomina Procesamiento del Lenguaje Natural (PLN), la cual estudia la interacción entre las computadoras y el lenguaje humano. Por ende, con ayuda de estas dos áreas se puede ofrecer sistemas computacionales capaces de interactuar con los seres humanos, lo que incrementan las funciones que pueden proporcionar aplicaciones que se alimentan de información proveniente de la sociedad.

En este trabajo se plantea la promoción de turismo nacional a través de las redes sociales, en este caso, Facebook es una de las más utilizadas permitiendo a sus usuarios compartir fotos, videos, comentarios y eventos por mencionar algunas actividades, de donde puede ser extraída información relevante para procesar y generar un perfil de dicho usuario, al igual que a través de un comentario se puede obtener una emoción.

## **2. Marco teórico**

El trabajo propuesto se enfoca en resolver un problema del sector turístico, en el cual se busca ayudar al incremento de esta actividad localmente. Para ello se desea utilizar algunas herramientas de la Inteligencia Artificial (IA) como son las Redes Neuronales Artificiales (RNA) y el Procesamiento de Lenguaje Natural (PLN).

Existen diversas definiciones de las Redes Neuronales Artificiales, [5] las describe como modelos de Aprendizaje Máquina que surgieron como un intento de desarrollar formalizaciones matemáticas acerca de la estructura del cerebro. Por otra parte [6] las define como un procesamiento distribuido masivamente paralelo que tiene una tendencia natural para almacenar conocimiento empírico y hacerlo disponible para el uso. Esto recuerda al cerebro en dos aspectos:

- El conocimiento se adquiere por la red a través de un proceso de aprendizaje.
- Las conexiones interneuránicas se conocen como pasos sinápticos y se usan para almacenar el conocimiento.

Debido a su constitución y a sus fundamentos, las Redes Neuronales presentan una gran similitud con el cerebro humano, por ejemplo tienen la capacidad de aprender de la experiencia, abstraer características esenciales a partir de entradas que representan información irrelevante, generalizar de casos anteriores a casos nuevos, etc. Esto hace que se puedan tener numerosas ventajas tales como:

- aprendizaje adaptativo.
- Auto-organización.
- Tolerancia a fallos.
- Operación en tiempo real, por mencionar algunas.

De esta manera, las Redes Neuronales Artificiales pueden ser aplicadas a diversas áreas de conocimiento, lo cual se ve reflejado en aplicaciones como las de predicción de viento, reconocimiento de objetos en imágenes, clasificación de elementos, etc.

Por otro lado, el Procesamiento de Lenguaje Natural es un área que estudia las interacciones entre la computadora y el lenguaje humano, en otras palabras tiene como objetivo desarrollar sistemas informáticos capaces de trabajar con el lenguaje verbal humano ya sea oral y/o escrito tratando de aportar utilidad para el usuario, de esto se puede derivar el Análisis de Sentimientos (*Sentiment Analysis*) y *Author Profiling*.

El Análisis de Sentimientos (AS) es el proceso de determinar el tono emocional que hay detrás de una serie de palabras, lo cual es utilizado para entender las actitudes, opiniones y emociones expresadas en comentarios *online* [8]. El AS es considerado de gran utilidad para la monitorización de las redes sociales ya que permite tener una idea de la opinión pública general sobre ciertos temas, clasificándolos en su mayoría de veces como positivos, negativos, nulos o neutros [17, 18].

Author Profiling puede ser definido como la representación de un conjunto de características que describen a una persona, en el cual se pueden almacenar tanto datos personales y características del sistema computacional, como patrones de comportamiento, intereses y preferencias [7].

### **3. Desarrollo**

El desarrollo de este trabajo fue dividido en tres partes: Análisis de Sentimientos, Perfilado de Usuarios y la Elaboración de una base de datos sobre las áreas turísticas.

#### **Análisis de Sentimientos**

Autores como [19] proponen desarrollar un diccionario que puede indicar una estimación de la frecuencia con que una palabra se usa con un sentido relacionado con una emoción a diferencia de [17, 18] que solo marcan el nivel o la fuerza que tiene cada palabra respecto a una emoción.

Es por ello que, para llevar a cabo el Análisis de Sentimientos es utilizado *DatumBox Machine Learning Framework* [4], a través del API para el Análisis de Sentimientos, dicha API clasifica en positivo, negativo y neutro en el idioma inglés,



como se muestra en [21], para que cumpliera el propósito de este trabajo fue modificado al idioma español y clasifica en base a las seis emociones básicas propuestas por Paul Ekman en 1972 (alegría, enojo, repulsión, sorpresa, tristeza y miedo).

### **Perfilado de Usuarios (*Author Profiling*)**

Se sabe que el Perfilado de Usuarios es utilizado para conocer la máxima información personal posible de un usuario, gracias a él se puede conocer la edad [9, 10, 11, 13], el género [10, 12, 13], los rasgos de personalidad [11, 13], las emociones [11], etc. Algunos autores como [14] y [15] realizan el perfilado con la ayuda del modelo *Big Five* o *Five Factor Model* pues es considerado como el modelo más acertado en la descripción y comprensión de la personalidad humana. El modelo de los Cinco Grandes Factores (*Big Five*) de personalidad se ha destacado sobre otros modelos debido a que éste utiliza cortos cuestionarios (fácil procesamiento) y existe un gran número de instrumentos creados para su medida, de ellos el más usado es el NEO-PI-R, *Revised Neo Personality Inventory* [20] publicado en español con el nombre Inventario de Personalidad NEO Revisado. Este instrumento evalúa los principales factores de personalidad: Neuroticismo, Extraversión, Apertura, Amabilidad y Responsabilidad. Cada factor se compone de seis escalas o facetas, medidas por ocho ítems cada una, lo que hace un total de doscientas cuarenta cuestiones a responder. Existe una versión resumida, compuesta por los sesenta primeros ítems de la prueba (doce por factor), que constituye el *NEO Five-Factor Inventory* (NEO-FFI), es decir, Inventario NEO reducido de Cinco Factores. Éste permite obtener una medida rápida y general de los Cinco Factores de personalidad, como se muestra en la tabla 1.

La personalidad podría definirse como el conjunto de características físicas, genéticas y sociales que reúne un individuo, y que lo hacen diferente y único respecto del resto de los individuos. Aun así, hay ciertas características comunes que se comparten entre distintas personas, en menor o mayor grado, que pueden ser observadas y medidas a través de distintos indicadores. Siguiendo la teoría de Allport [16] sobre la personalidad enfatiza que en las etapas de la edad adolescente y adulta se observan los rasgos de personalidad o características que hacen a una

persona distinta de otra, y se busca obtener rasgos de la personalidad que no se pueden observar con los sentidos, como los colores o los sabores, esto con la ayuda del test NEO-FFI [3]. La prueba se aplicó a estudiantes y trabajadores que oscilan entre los 18 a los 32 años de edad. La característica que predomina en las personas seleccionadas es que cuentan con ingresos estables y disponen de tiempo y energía para el turismo.

Tabla 1 Rasgos de personalidad.

PERSONALIDAD	RASGOS REPRESENTATIVOS
Neuroticismo	Ansiedad, Agresión-Hostilidad, Depresión, Ansiedad social, Impulsividad, Vulnerabilidad al estrés
Extroversión	Cordialidad, Gregarismo, Asertividad, Actividad, Búsqueda de emociones, Emociones positivas
Apertura a la Experiencia	Fantasia, Estética, Sentimientos, Acciones, Ideas, Valores
Amabilidad	Confianza, Franqueza, Altruismo, Actitud conciliadora, Sensibilidad a los demás
Responsabilidad	Competencia, Orden, Necesidad de logro, Autodisciplina, Deliberación

La prueba aplicada a una muestra de 70 personas, en su mayoría estudiantes de universidad, fue obtenida de [2]. Sin embargo, se espera incrementar el número de muestras para la mejora de resultados, como se ve en la figura 1, así que se busca obtener los dos rasgos de personalidad predominantes de cada individuo. Para este proceso se propone la aplicación de una red neuronal feed forward con una capa oculta. Como datos de entrada para la red neuronal se consideran diez variables: intervalos de edad, el género, ocupación y los cinco rasgos de personalidad que proporciona la aplicación de la prueba. Con la red neuronal se identificarán las dos principales personalidades en cada individuo de forma automática, figura 1.

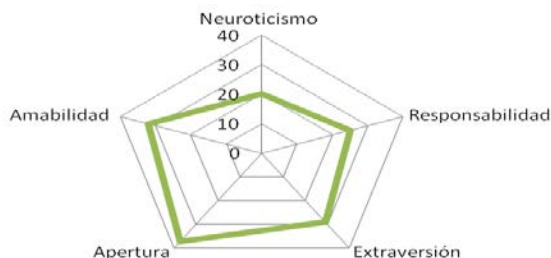


Figura 1 Rasgos de personalidad.

## Base de Datos

Para generar una recomendación turística se ha desarrollado una base de datos en la cual se tienen los distintos lugares turísticos a recomendar dentro del estado de Tlaxcala. En la tabla 2 se muestra un ejemplo de ella, así como las actividades que se desarrollan en cada uno de los lugares, dichas actividades serán relacionadas con las personalidades obtenidas del test.

Tabla 2 Extracto de ejemplo de la base de datos turismo.

Nombre	Domicilio	Localidad	Municipio	C.P.	Categoría	Actividades
Centro Vacacion IMSS Trinidad	Carretera Santa Cruz - Tlaxcala	Ex Fábrica Textil	Santa Cruz Tlaxcala	90640	BALNEARIOS	Arquitectura, albercas, lago artificial, campamento, deportes, juegos infantiles, casa rodante, hospedaje, balneario
Rancholandia	Carretera Apizaco-Tlaxcala km 21	Tecoma-lucan	Tlaxco	90270	CABAÑAS	Tirolesas, lago, lanchas, pesca, palapas, canchas deportivas, parque infantil, cuatrimotos, bicicletas, caminata, esferas gigantes de agua y pasto, pistas para carros tubulares, cafetería, cabañas
Campamento Esperanza	La Caridad Cuaxona-cayo	Ixtacuixtla	Ixtacuixtla	90131	CENTROS ECO TURÍSTICOS	Hospedaje, áreas verdes, campamento, deportes, volcán, zoológico, zona arqueológica, cabañas, ecoturismo
Hacienda Santa Bárbara "Casa Malinche"	Ex Hacienda Santa Bárbara	Chapultepec	Huamantla	90525	HACIENDAS Y EX HACIENDAS	Hospedaje, temazcal, senderismo, montañismo, descanso, áreas verdes, bicicleta/montaña, deportes, alimentos, hacienda
Globo3uno	Matamoros Pte. No. 211	Col. Centro	Huamantla	90500	TURISMO NATURALEZA	Globo, naturaleza
Posada Tlaxcala	Lardizabal No. 35-B	Col. Centro	Tlaxcala	90000	HOTEL	Hospedaje, spa, temazcal, hotel

## 4. Resultados

Se ha llevado a cabo la aplicación del test en una población de entre 18 y 32 años de edad en su mayoría son estudiantes y trabajadores. Los resultados

obtenidos de la prueba fueron datos sesgados, como se puede observar en la figura 2, donde las personalidades predominantes son amabilidad y responsabilidad.

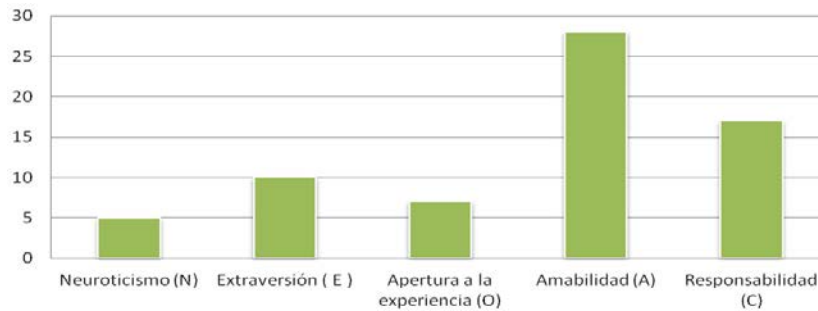


Figura 2 Resultado de personalidades.

La población muestra se segmentó en tres grupos de edades, de 18 a 22, 23 a 27 y 28 a 32 años, de lo cual se puede observar, en la figura 3, que los grupos tienden a ser con personalidades de amabilidad y responsabilidad.

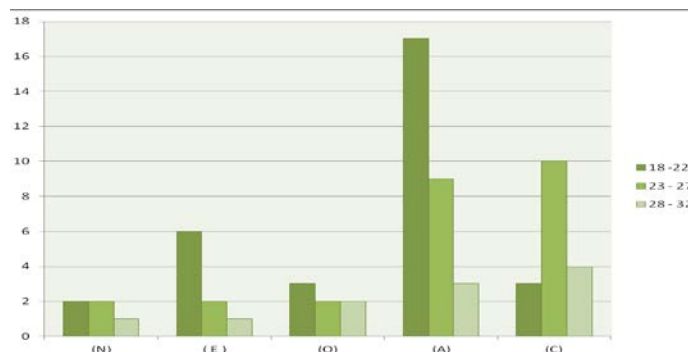


Figura 3 Resultados de personalidad por grupos por edad.

De los datos obtenidos, por medio del test, se asignan las variables de entrada para la red neuronal artificial mostrada en figura 4.

Como datos de entrada para la RNA son utilizados los obtenidos a través de la aplicación de la prueba, los cuales son la edad, el género, la ocupación y los Cinco Factores de personalidad, con ello se desea obtener la tendencia de las actividades a realizar en el sector turístico mediante la personalidad de cada individuo, finalizando con un sistema de evaluación el cual nos dará en orden las

actividades a realizar. En estos momentos la implementación y pruebas de la red neuronal se encuentran en la etapa de desarrollo. Sin embargo, se ha presentado su arquitectura para identificar la forma en que operará y las variables que permitirán llevar a cabo la evaluación de los sentimientos y la recomendación del lugar turístico.

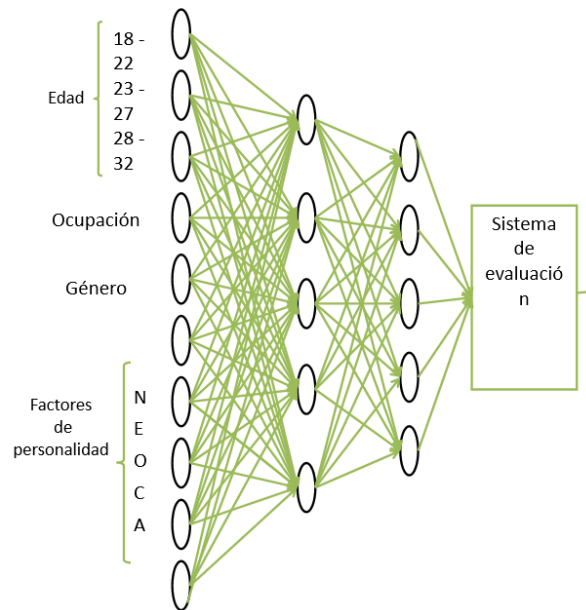


Figura 4 Arquitectura de la RNA utilizada.

## 5. Discusión

El Procesamiento del Lenguaje Natural y las Redes Neuronales Artificiales son áreas fundamentales dentro de la Inteligencia Artificial. A pesar de la gran cantidad de trabajos escritos alrededor de ellas, no se tienen demasiados registros de que estas dos áreas hayan sido combinadas.

Se tienen numerosos antecedentes donde se incorpora el aprendizaje automático, por otra parte, las RNA se han aplicado a un extenso número de problemas con características similares a los del PLN. Sin embargo, el número de estudios que hacen uso de RNA en PLN es muy reducido y más si se trata del Perfilado de Usuarios. Y de manera asombrosa, los resultados obtenidos de dichos trabajos ponen de manifiesto que el uso de un enfoque neuronal es una considerable alternativa para la construcción de PLN basado en lenguaje.

## 6. Conclusiones

En este trabajo se plantea una forma de ayudar al incremento del sector turístico de forma local, con la ayuda de la Inteligencia Artificial, con el uso específico de las Redes Neuronales, el Perfilado de Usuario y el Análisis de Sentimientos.

Para el logro de este objetivo se ha dividido en tres secciones, en primera la obtención del estado emocional de una persona con la ayuda del software libre DatumBox, la segunda que consiste en la aplicación del test NEO-FFI para conocer los rasgos de personalidad de los usuarios y por último, la elaboración de una tabla que contiene datos de los distintos lugares turísticos posibles a recomendar en determinada región.

Se ha aplicado el test en estudiantes universitarios y trabajadores con edades entre 18 y 32 años de edad, obteniendo datos sesgados hacia las personalidades amabilidad y responsabilidad. Los datos obtenidos de la aplicación del test serán procesados por medio de una Red Neuronal Artificial, la cual nos dará una tendencia de las actividades a realizar en cuanto a las personalidades obtenidas por persona.

Con la ayuda del uso de las Redes Neuronales Artificiales, se tienen diversas ventajas, como ya se dijo tratan de simular el cerebro humano, las RNA ayudan a procesar una gran cantidad de información de forma concreta, aprenden de la experiencia, son auto organizadas y tiene tolerancia a fallos. Mostrando con ello que en algunos aspectos muestran superioridad ante el cerebro humano, sobre todo en cuanto a la velocidad. En los próximos meses se obtendrán los análisis comparativos de la red neuronal para verificar la evaluación integral del sistema.

## 7. Bibliografía y Referencias

- [1] México despegará con el 4G y el Internet móvil en 2019. <http://eleconomista.com.mx/tecnociencia/2015/03/06/mexico-despegara-4g-internet-movil-2019>. Junio 2016
- [2] J. Dolcet, I. Serra. *Carácter y temperamento: similitudes y diferencias entre los modelos de personalidad de 7 y 5 factores*. 2006.

- [3] Sistema Experto: Rasgos de la Personalidad. <http://www.it.uc3m.es/jvillena/irc/practicas/07-08/TestDePersonalidad.pdf>.
- [4] Documentación del proyecto Datumbox Machine Learning Framework. <http://www.datumbox.com/files/API-Documentation-1.0v.pdf>. 2013
- [5] R. Flórez López. Análisis de los determinantes del riesgo de crédito. 2012. <http://www.icac.meh.es/Documentos/PUBLICACIONES/246.pdf>.
- [6] Neural Networks: A comprehensive foundation. <http://www.federaljack.com/ebooks/Consciousness%20Books%20Collection/Simon%20Haykin%20-%20Neural%20Networks.%20A%20Comprehensive%20Foundation.pdf>.
- [7] E. DAgostino, A. Casali, R. Corti, A. Torres, M. Siragusa, B. López, "Sistema de Apoyo al Aprendizaje Diagnóstico Utilizando Perfiles de Usuario: EndoDiag II". Eia. udg. Es. 2005. Pp. 1-14.
- [8] Entendiendo el análisis de sentimiento: qué es y para qué se usa. <https://www.brandwatch.com/es/2015/02/analisis-de-sentimiento>. Junio2016
- [9] Y. Alemán, D. Vilariño, D. Pinto, "Una metodología para la detección del perfil de un autor". Research in Computing Science. Vol. 85. 2014.
- [10] P. Espinoza, D. Vilariño, D. Pinto, M. Tovar, B. Beltrán, "Identificación de perfiles de usuario". Research in Computing Science. Vol. 95. 2015.
- [11] F. Rangel, "Author Profile in Social Media: Identifying Information about Gender, Age, Emotions and beyond". In Proceedings of the 5th BCS IRSG Symposium on Future Directions in Information Access. 2013. Pp. 58-60.
- [12] F. Rangel, P. Rosso, "On the identification of emotions and authors' gender in facebook comments on the basis of their writing style". In CEUR Workshop Proceedings. Vol. 1096. 2013. Pp. 34-46. CEUR Workshop Proceedings.
- [13] J. P. Posadas-Durán, I. Markov, H. Gómez-Adorno, G. Sidorov, I. Batyrshin, A. Gelbukh, O. Pichardo-Lagunas, "Syntactic N-grams as Features for the Author Profiling Task". 2015.
- [14] J. Golbeck, C. Robles & K. Turner, "Predicting personality with social media". In CHI'11 extended abstracts on human factors in computing systems. May 2011. Pp. 253-262. ACM.

- [15] R. Bayot, T. Gonçalves, P. Quaresma, Author Profiling of Twitter Users. <http://ceur-ws.org/Vol-1391/123-CR.pdf>
- [16] A. Gordon. Qué es la personalidad. 2000.
- [17] P. Turney, "Thumbs Up or Thumbs Down? Semantic Orientation Applied to Unsupervised Classification of Reviews". Proceedings of the Association for Computational Linguistics. 2002. Pp. 417–424.
- [18] B. Pang, L. Lee, S. Vaithyanathan, "Thumbs up? Sentiment Classification using Machine Learning Techniques". Proceedings of the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2002. Pp. 79–86.
- [19] R. I. Díaz, G. Sidorov, G. Suárez-Guerra, "Creación y evaluación de un diccionario marcado con emociones y ponderado para el español". *Onomazein*, Vol. 29. 2014. p. 23.
- [20] P. T. Costa, R. R. McCrae, "Four ways five factors are basic". *Personality and individual differences*. Vol. 13. Issue 6. 1992. Pp. 653-665.
- [21] M. P. Jaén Rendón, I. Algreto Badillo, L. A. Morales Rosales. "Recomendaciones turísticas basadas en el análisis de sentimientos en Español y utilizando la red social Facebook". *Tlaxcala Memorias 2016* ISSN. Vol. 8. No. 2. 2016. Pp. 532-537.

## **8. Autores**

La Ing. María de la Paz Jaén Rendón es estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla, México. Actualmente su interés de investigación es en las líneas de análisis de sentimientos y obtención de perfiles para generar recomendaciones.

La Psic. Graciela Maceda Gómez trabaja en la Universidad Politécnica de Tlaxcala como responsable del Servicio de Psicología, donde el principal objetivo es atender en acompañamiento terapéutico a los alumnos, así como también realizar campañas de prevención y programas para atender a los estudiantes en riesgo, dirigidos a toda la comunidad universitaria. Su formación es humanista con un



enfoque clínico, su área de especialización es en Intervención en crisis y Atención al Suicidio, Logoterapia e Hipnosis Eriksoniana.

El Dr. Ignacio Algreto-Badillo se desempeña como profesor de tiempo completo en la Universidad Politécnica de Tlaxcala. Él es miembro del SNI desde el 2011, tiene más de 70 artículos científicos, es revisor en varios comités nacionales e internacionales, lidera varios proyectos y sus líneas de investigación son enfocadas en el diseño y desarrollo de sistemas digitales, arquitecturas reconfigurables, plataformas basadas en el concepto radio software, seguridad, prototipos didácticos, sistemas criptográficos, implementaciones en FPGA, sistemas basados en microcontroladores y microprocesadores y aceleración en hardware para aplicaciones específicas.

El Dr. Luis Alberto Morales Rosales es fundador y coordinador del programa de posgrado en sistemas computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, fungiendo como responsable técnico en la incorporación al PNPC del Conacyt, tiene más de 30 artículos científicos, es revisor en varios comités nacionales e internacionales, lidera diversos proyectos con financiamiento y sus líneas de investigación son enfocadas al cómputo móvil, sistemas distribuidos, desarrollo de algoritmos bioinspirados, computación inteligente, sistemas evolutivos, desarrollo aplicaciones inteligentes para educación, minería de datos, seguridad informática, visión artificial y realidad aumentada.

La M.S.C. Mariana Lobato Báez es profesora investigadora en el Instituto Tecnológico Superior de Libres, cuenta con diversas publicaciones nacionales e internacionales, su área de investigación es el cómputo inteligente y las tecnologías emergentes aplicadas a la educación.

# PROTOCOLO DE AUTENTICACIÓN MUTUA ENTRE VEHÍCULO Y UNIDAD EN CARRETERA BASADO EN EL ALGORITMO DIFFIE-HELLMAN PARA UNA RED VANET

***Julio César Betancourt Saucedo***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, División Multidisciplinaria de Ciudad Universitaria  
*al107473@alumnos.uacj.mx*

***Rafael Martínez Peláez***

Universidad de la Salle Bajío, Facultad de Ingeniería en Computación y Electrónica  
*rmartinezp@delasalle.edu.mx*

***Pablo Velarde Alvarado***

Universidad Autónoma de Nayarit, Área de Ciencias Básicas e Ingenierías  
*pvelarde@uan.edu.mx*

***Joel Ruíz***

Universidad Estatal de Sonora, Departamento de Ingeniería de Software  
*joel.ruiz@ues.mx*

***Yesica I. Saavedra Benítez***

Instituto Tecnológico de Toluca, División de Estudios de Posgrado e Investigación  
*ysaavedrab@toluca.tecnm.mx*

## **Resumen**

El proceso de autenticación es un componente clave para incrementar la seguridad en una red vehicular. La mayoría de los protocolos de autenticación propuestos en la literatura, se basan en criptografía asimétrica, y específicamente en el uso del algoritmo RSA. Además, se considera el uso de certificados digitales y una infraestructura de clave pública. Por lo tanto, el proceso de autenticación suele ser complejo. Con la intención de proponer una solución segura, sin el uso de certificado digitales y el algoritmo RSA, se presenta un protocolo de autenticación mutua basado en el algoritmo Diffie-Hellman para establecer una

clave de sesión entre vehículo (OBU) y unidad de carretera (RSU). A partir de la clave de sesión, se puede establecer un canal de comunicación seguro para transmitir el identificador de cada participante y los respectivos parámetros de seguridad. Para realizar el proceso de autenticación, las entidades realizan operaciones de bajo costo computacional, como son funciones hash y XOR. Una vez concluido el protocolo de autenticación mutuo, el vehículo y la unidad de carretera podrán intercambiar mensajes de manera segura.

**Palabra(s) Clave(s):** algoritmo Diffie-Hellman, autenticación mutua, intercambio de claves, registro de vehículos, VANET.

## 1. Introducción

De acuerdo a información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el número de accidentes de tránsito terrestre en las zonas urbanas del país fue de 378,240 durante el año 2014. El 1.1% de dichos accidentes fueron fatales, se perdieron 4,708 vidas. En este sentido, la Organización Mundial de la Salud estima que 1.24 millones de personas pierden la vida a causa de accidentes de tránsito cada año [1]. En consecuencia, se han realizado diversos esfuerzos para reducir el número de accidentes de tránsito terrestre, entre las que se encuentran: sanciones legales más severas, operativos de tránsito, y desarrollos tecnológicos.

Uno de los desarrollos tecnológicos que más ha llamado la atención es la red ad-hoc vehicular o *vehicular ad-hoc network* (VANET) [2]. La red VANET tienen su origen en las redes inalámbricas que han ganado bastante popularidad entre los empresarios y usuarios debido a la comodidad de poderse conectar a la red de redes desde cualquier lugar y en cualquier momento. Además, se ha mejorado la tasa de transferencia y la distancia de alcance de las comunicaciones inalámbricas, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios. También, se tiene que tener en cuenta los bajos costos relacionados con la adquisición de dispositivos y por conectividad. En conjunto, las redes inalámbricas son la base de nuevos desarrollos tecnológicos, como son: redes de sensores

inalámbricas, redes ad-hoc, redes móviles ad-hoc, y más recientemente el Internet de las cosas.

Las redes ad-hoc son redes que se comunican a través de un medio inalámbrico y sin la necesidad de una infraestructura; es decir, las redes ad-hoc se pueden establecer en cualquier lugar [3]. En el siguiente paso de evolución, se encuentran las redes móviles ad-hoc. A diferencia de su predecesor, las redes móviles ad-hoc son capaces de adaptarse a los cambios de topología a través de protocolos de enrutamiento proactivos y reactivos. En vista de su versatilidad y rendimiento, se produjo la adaptación a redes vehiculares.

Las redes vehiculares requieren de una unidad a bordo u *on board unit* (OBU) y un componente de infraestructura de carretera o *road side unit* (RSU) [4]. A través de la OBU, el vehículo se puede comunicar con otros vehículos (comunicación OBU-OBU) a lo largo de una carretera o con la RSU (comunicación OBU-RSU). En conjunto, se busca mejorar la experiencia de manejo de las personas, haciendo más seguro el camino y con mejores rutas.

Sin embargo, las redes vehiculares son propensas a ser atacadas [5] debido al medio de comunicación, movilidad y falta de procesamiento en la OBU. En consecuencia, un atacante puede generar e inyectar paquetes con información falsa a la red, generando problemas de vialidad. Para incrementar la seguridad en una red vehicular, se han propuesto mecanismos de autenticación que limiten el intercambio de paquetes entre usuarios legítimos, en alguno de los escenarios existentes: OBU-OBU y OBU-RSU.

En [6], se propone un esquema de autenticación basada en infraestructura, donde se usa un sistema de autenticación mutua entre RSU y OBU. Tiene como principal característica preservar la identidad del vehículo. El proceso de autenticación se lleva a cabo mediante el intercambio de claves públicas, certificados digitales e información cifrada. La desventaja de este esquema es el alto costo de almacenamiento y procesamiento computacional.

En [7], se propone un esquema basado en criptografía simétrica, gracias a este procedimiento, se reduce el procesamiento computacional; sin embargo, el receptor no puede comprobar si dicha entidad es quien dice ser.

En [8], se utiliza un sistema de grupo de claves aleatorias para autenticar a los vehículos con la *RSU*, pero este esquema no cuenta con una autoridad confiable o *trusted authority* (TA), siendo más probable que las unidades mientan sobre su verdadera identidad.

En el presente trabajo se propone un protocolo de autenticación entre OBU-RSU utilizando el protocolo de intercambio de clave presentado por Diffie-Hellman en 1976 [9] y operaciones de bajo costo computacional, como son funciones hash [10] y XOR.

El artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera. En la sección 2, se describen los conceptos básicos de una red vehicular. En la sección 3, se describen los supuestos y la nomenclatura. En la sección 4, se introduce el proceso de registro de la OBU. En la sección 5, se presenta la propuesta del protocolo de autenticación. En la sección 6, se realiza el análisis de seguridad del protocolo propuesto. Finalmente, se presentan las conclusiones del artículo en la sección 7.

## **2. Redes Vehiculares: Conceptos Básicos**

En la actualidad, los vehículos se han convertido en "computadoras motorizadas" o "redes motorizadas", donde la comunicación vehículo a infraestructura cada vez es más importante. Por lo tanto, los vehículos deben ser equipados con herramientas que sean capaces de establecer una red VANET estable y segura.

### **Componentes de una red vehicular**

Los principales componentes de una red vehicular son: OBU, RSU y TA [4]. A continuación, se describe cada componente con sus principales características:

- OBU [4]: unidad de comunicación que tiene la funcionalidad de procesar y gestionar la información recibida para su transmisión. Una OBU debe ser capaz de enviar y recibir información otros OBUs y/o RSUs, manteniendo de esta manera un viaje seguro de los conductores. Las unidades se encuentran equipadas con una EDR (registrator de datos de eventos,

graba información sobre percances o accidentes), GPS (sistema de posicionamiento global), interfaz de comunicación inalámbrica de bajo alcance, y cuenta con un ancho de banda de 75 MHz en una banda de 5.850 - 5.925 GHz [6]. La se alimenta con la energía proporcionada por la batería del vehículo. Las OBUs se encuentran limitadas en el poder de procesamiento y poder de transmisión. Es importante mencionar que, la OBU tiene que registrar toda su información y clave privada en una Autoridad Confiable [11].

- RSU [4]: son unidades estáticas que se encuentran en las inmediaciones de la carretera, no están en movimiento. La RSU provee apoyo en la autenticación de mensajes con las OBUs, logrando así el menor uso de procesador y de memoria en los vehículos. Este tipo de unidades no tienen restricciones en cuanto a poder de procesamiento, energía y poder de transmisión. Estas unidades se encuentran estratégicamente localizadas a una cierta distancia de la carretera y de unas a otras, similar a un punto de acceso en una red convencional, para proveer información y comunicación a las OBUs y otras RSUs. Algunas de estas unidades se encuentran conectadas a una red troncal centralizada [11].
- TA [11]: este componente puede ser una autoridad de certificación (CA), división de vehículos motorizados (MVD), etc. Este tipo de componentes gestionan y verifican las credenciales. Estos centros no deben ser comprometidos y deben permanecer lo más confiables posible [11].

### **Aplicaciones de las redes vehiculares**

A continuación, se describe dos aplicaciones de las redes vehiculares en pro de la comodidad y seguridad del conductor. El escenario de estudio es la comunicación entre OBU-RSU.

Aplicaciones en la seguridad [12], [11]: se pueden dividir principalmente en tres campos;

- asistencia (geolocalización, manejo asistido con otros vehículos, cambio de carril seguro, etc.),

- información (aviso de obras públicas en el camino, despliegue de señales de tránsito), y
- advertencia (obstáculos o estado físico de la carretera, avisos sobre accidentes, etc.).

Esto se logra gracias a la información que recaban las RSUs y transmiten a vehículos (OBUs) al pasar cerca de ellas; esta comunicación debe ser directa y con el mínimo retraso posible, ya que, la información es muy importante para mantener al conductor bien informado.

Aplicaciones orientadas a la comodidad del usuario [13]: una RSU puede informar de promociones, realizar transacciones de pagos, y transmitir información comercial, sobre los establecimientos cercanos a la ruta del conductor. También, se pueden utilizar para descargar música o realizar compras en línea [14].

### **3. Preliminares**

Debido a la complejidad de una red VANET, se ha tenido que realizar los siguientes supuestos:

- La *OBU* que desea ingresar a la red debe estar previamente registrado en la *TA*, de lo contrario la *RSU* rechazaría su petición de conexión al verificar que no está registrado en el sistema.
- La *RSU* no tiene limitaciones de energía, capacidad de procesamiento y almacenamiento.
- La *TA* es una entidad de confianza, tanto para la *RSU* como para la *OBU*.
- La comunicación entre la *TA* y la *RSU* es segura.
- La *TA* es un organismo que tiene la facultad de generar el identificador para cada *OBU*.
- La *TA* es la encargada de generar los valores  $g$ ,  $p$ ,  $W_{OBU}$ ,  $Z_{OBU}$ .
- La *TA* almacena la información en un servidor seguro – se cifra la información o se cifra el disco duro.
- La *RSU* conoce los valores  $g$ ,  $p$ .
- Las entidades participantes utilizan SHA-2 para calcular la función *hash*.

La tabla 1 presente la nomenclatura utilizada a lo largo del documento.

Tabla 1 Nomenclatura.

Nomenclatura	Definición
$TA$	Autoridad Confiable
$RSU$	Unidad en Carretera
$OBU$	Unidad a Bordo
$ID$	Identificador de la $OBU$
$K_{RSU}$	Clave secreta de la $RSU$
$K_{OBU}$	Clave secreta de la $OBU$
$\Delta T$	Tiempo de validez de la clave de sesión
$H()$	Función hash
$ID$	Identificador de la $OBU$
$h_i = H()$	Resultado de una función hash que pertenece a la entidad $i$
$G$	Generador
$P$	Número primo
$\otimes$	Or-exclusivo
$W_{OBU}$	Número aleatorio para cada $OBU$
$Z_{OBU}$	Número aleatorio para cada $OBU$
$R$	Clave de sesión entre $OBU$ y $RSU$
$A = E_R(m)$	Cifrado simétrico de un mensaje con la clave de sesión $R$
$D_R(A) = m$	Descifrado simétrico de un mensaje cifrado con la clave de sesión $R$

#### 4. Registro de la OBU

Para que la  $OBU$  pueda recibir información de una  $RSU$ , se debe realizar el registro de la unidad. El proceso se divide en dos etapas. La primera etapa es crear el  $ID$  del vehículo y el segundo proceso es generar y almacenar los parámetros de seguridad en la  $OBU$  y en la  $TA$ . A continuación, se describen los dos procesos.

##### Generación del identificador

El usuario debe realizar el proceso de registro para poder ingresar a la red VANET. En dicho proceso, se generará el  $ID$  de la  $OBU$  y quedará registrada en la  $TA$ . La figura 1 muestra los componentes del  $ID$ . El proceso se describe a continuación:

- Paso 1: El propietario del vehículo debe asistir a las oficinas de la  $TA$  y presentar en físico la información del vehículo y su licencia de conducir.



- Paso 2: El personal de la TA corrobora el VIN (*Vehicle Identification Number*) y las placas del vehículo.
- Paso 3: El personal de la TA corrobora la legitimidad de la licencia de conducir.
- Paso 4: El personal de la TA genera el ID del vehículo combinando información del VIN, placas y licencia de conducir.

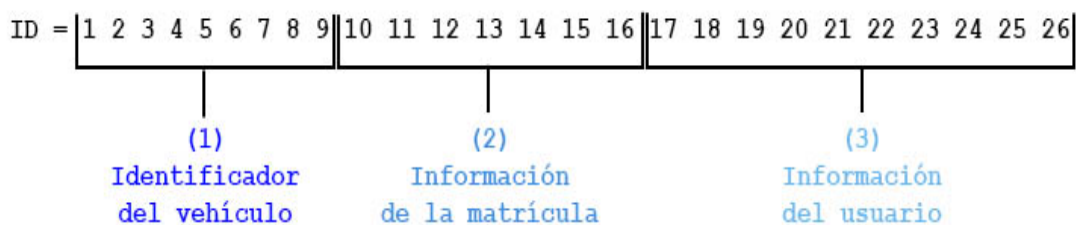


Figura 1 Componentes del ID del OBU.

A continuación, se detallan los tres componentes que dan origen al *ID* del vehículo. Cabe mencionar que, el proceso propuesto permitirá generar identificadores únicos, evitando la duplicidad en el sistema:

- Identificador del vehículo. Los primeros nueve dígitos del ID son tomados del VIN. El VIN se considera como la huella dactilar del vehículo. Los primeros tres dígitos informan sobre la identificación del fabricante (región en que fue ensamblado y el tipo de vehículo). Los siguientes cinco dígitos despliegan la descripción física del vehículo: peso o potencia del vehículo, tipo de vehículo (camioneta, van, coche, etc.), modelo en específico del coche, número de puertas, información del motor. Por último, se presenta un identificador que el fabricante autorizó.
- Información de la matrícula. Los siguientes siete dígitos del ID representan íntegramente la matrícula (placas) del vehículo. Las placas de vehículos que circulan en el interior de la república mexicana constan de siete dígitos, mientras que, las placas para vehículos que circulan en el Distrito Federal y áreas metropolitanas constan de seis dígitos. Las placas del vehículo permiten identificar si el vehículo se encuentra en orden para circular.

- Información del usuario. Los últimos diez dígitos del ID son los números de serie de la licencia de conducir del propietario del vehículo. Por medio de la licencia de conducir se puede relacionar al propietario con el vehículo.

### Generación de parámetros de seguridad

Una vez concluido el proceso de registro, se tiene un *ID* por cada *OBU*; por lo tanto, se debe calcular parámetros de seguridad que permitan a las *RSU*, verificar la identidad de las *OBUs*. La *TA* realiza el siguiente procedimiento:

- Paso 1: CALCULA  $h_{OBU} = H(ID)$ .
- Paso 2: GENERA  $Z_{OBU}$  y  $W_{OBU}$ .
- Paso 3: CALCULA  $h_{TA-OBU1} = H(Z_{OBU})$  y  $h_{TA-OBU2} = H(W_{OBU})$ .
- Paso 4: CALCULA  $h_{TA-OBU3} = H(h_{TA-OBU1} \otimes h_{TA-OBU2} \otimes ID)$ .
- Paso 5: CALCULA  $C = h_{TA-OBU3} \otimes ID$ .
- Paso 6: COMPARTE  $h_{OBU}$  con todas las *RSU*.
- Paso 7: ALMACENA  $g, p, h_{OBU}, h_{TA-OBU1}, h_{TA-OBU2}, h_{TA-OBU3}$  en la *OBU*.
- Paso 8: ALMACENA  $ID, g, p, h_{OBU}, h_{TA-OBU1}, h_{TA-OBU2}, C$  en la *TA*.

## 5. Propuesta de Protocolo de Autenticación

El protocolo de autenticación se basa en el algoritmo Diffie-Hellman [9]. El protocolo consta de las dos primicias básicas de seguridad: autenticación mutua y establecer una clave de sesión.

### Establecimiento de la clave de sesión

La *OBU* realiza los siguientes pasos:

- Paso 1: GENERA  $K_{OBU} > p$  en donde  $K_{OBU}$  se obtiene del reloj de la *OBU*.
- Paso 2: CALCULA  $x = g^{K_{OBU}} \text{ mod } p$ .
- Paso 3: ENVÍA  $x \parallel h_{OBU}$  a *RSU* a través de un canal de comunicación abierto.

Una vez recibido la solicitud de autenticación ( $x \parallel h_{OBU}$ ), la *RSU* verifica en la base de datos que se encuentre el  $h_{OBU}$ . En caso de no encontrarse se termina la comunicación; en caso contrario, se realizan los siguientes pasos:

- Paso 4: GENERA  $K_{RSU} > p$  en donde  $K_{RSU}$  se obtiene del reloj de la  $RSU$ .
- Paso 5: CALCULA  $y = g^{K_{RSU}} \text{ mod } p$ .
- Paso 6: ENVÍA  $y$  a  $RSU$  a través de un canal de comunicación abierto.
- Una vez que ambas partes conocen los valores  $(x, y)$ , se procede a calcular la clave de sesión.
- Paso 7:  $OBU$  CALCULA  $R = y^{K_{OBU}} \text{ mod } p$ .
- Paso 8:  $RSU$  CALCULA  $R = x^{K_{RSU}} \text{ mod } p$ .

Una vez calculada la clave de sesión  $R$ , ambas partes pueden intercambiar información de manera segura a través de un canal de comunicación abierto. En este momento, la  $OBU$  y la  $RSU$  tienen la misma clave de sesión, pero aún no se ha realizado el proceso de autenticación mutua. Se ha verificado que la  $OBU$  se encuentra registrada en el sistema.

### Autenticación mutua

Después de haber sido establecido este canal de comunicación seguro, se procede a realizar un *challenge-response* para verificar la identidad de cada uno. Inicialmente, la  $OBU$  utiliza la información almacenada por la  $TA$  de la siguiente manera:

- Paso 1: Calcula  $D = h_{TA-OBU1} \otimes h_{TA-OBU2} \otimes h_{TA-OBU3}$ .
- Paso 2: Genera un número aleatorio  $V$ .
- Paso 3: Calcula  $E = h_{TA-OBU3} \otimes V$ .
- Paso 4: Calcula  $A = E_R(D \parallel E \parallel h_{OBU})$ .
- Paso 5: ENVÍA  $A$  a  $RSU$ .

Una vez que  $RSU$  recibe el mensaje ( $A$ ), la  $RSU$  procede a descifrar el mensaje y reenviarlo a la  $TA$ . Cuando la  $TA$  recibe el mensaje de la  $RSU$ , la  $TA$  procede a verificar la identidad de la  $OBU$ . El procedimiento es el siguiente:

- Paso 6: BUSCA en la base de datos  $h_{OBU}$  y obtiene los valores de  $ID$ ,  $h_{TA-OBU1}$ ,  $h_{TA-OBU2}$ , y  $C$ .
- Paso 7: CALCULA  $h_{TA-OBU3} = C \otimes ID$

- Paso 8: CALCULA  $h_{TA-OBUS}^* = h_{TA-OBUS1} \otimes h_{TA-OBUS2} \otimes D$
- Paso 9: COMPARA  $h_{TA-OBUS} ?= h_{TA-OBUS}^*$
- Paso 10: CALCULA  $V = h_{TA-OBUS} \otimes E$
- Paso 11: CALCULA  $V + 1$
- Paso 12: CALCULA  $F = V + 1 \otimes \Delta T$
- Paso 13: CALCULA  $G = h_{TA-OBUS} \otimes$  verificación de identidad de *RSU*
- Paso 14: ENVÍA  $F \parallel G \parallel$  Respuesta = valida o invalida a *RSU*.

Una vez que la *RSU* recibe el mensaje ( $F \parallel G \parallel$  Respuesta = valida o invalida), la *RSU* verifica la respuesta sobre la identidad de la *OBUS*. En caso que la respuesta sea negativa, la *RSU* procede a eliminar la clave de sesión *R* y cancela la comunicación. En caso contrario, se procede a compartir la clave de sesión *R* con *RSU* vecinas. Posteriormente, la *RSU* procede a cifrar y enviar el mensaje con la clave de sesión *R*. Cuando la *OBUS* recibe el mensaje de la *RSU*, la *OBUS* procede a realizar los siguientes pasos:

- Paso 14: CALCULA  $F = D_R(A)$
- Paso 15: CALCULA  $V + 1$
- Paso 15: CALCULA  $\Delta T = V + 1 \otimes F$
- Paso 16: CALCULA identidad de *RSU* =  $h_{TA-OBUS} \otimes G$ .
- Paso 17: VERIFICA identidad de *RSU* es positiva, se continúa utilizando la *R*, en caso contrario, la *OBUS* cancela la comunicación y elimina la *R*.

*Nota: El tiempo de validez de la clave de sesión para comunicarse con otras RSU se encuentra determinado por  $\Delta T$ . Una vez haya expirado el tiempo de validez, la OBUS deberá ser autenticada por otra RSU.*

## 6. Análisis de Seguridad

En este apartado, se realiza el análisis de seguridad del protocolo de autenticación propuesto. A continuación, se presenta los objetivos alcanzados con el protocolo propuesto:

- El protocolo cumple con el proceso de autenticación mutua. En el paso 9, la *TA* se encarga de verificar la identidad de la *OBU* mediante la comprobación del conocimiento del valor  $h_{TA-OBU3}$ . Se recuerda que dicho valor es generado por la *TA* en el proceso de registro. Por otra parte, la *OBU* verifica la identidad de la *RSU* mediante el mensaje enviado por la *TA* en los pasos 16 y 17.
- El protocolo cumple con establecer una clave de sesión. Al finalizar la primera parte del protocolo ambas entidades pueden calcular la clave de sesión  $R$ . El proceso se basa en el algoritmo DH.
- El protocolo cumple con mantener un canal de comunicación seguro. A través de la clave de sesión  $R$  ambas entidades pueden cifrar la información y mantener la confidencialidad.
- El protocolo cumple con mantener el identificador dinámico en el proceso de autenticación. Debido a que la *OBU* genera un número aleatorio  $V$ , cada vez que va a ser autenticado, el identificador es dinámico se puede mantener oculta su identidad con las *RSU*.
- El protocolo cumple con definir el tiempo de vida de la clave de sesión. Una vez que el tiempo  $\Delta T$  ha expirado, se solicitará a la *OBU* se vuelva a autenticar por la *RSU* en turno. De esta manera, se mantiene fresca la clave de sesión  $R$ .

A continuación, se explica la seguridad del protocolo en contra de ataques conocidos:

- Suplantación de identidad. En caso que un atacante o usuario mal intencionado decida realizar el ataque de suplantación de identidad deberá conocer la información almacenada en la *OBU* ( $g, p, h_{OBU}, h_{TA-OBU1}, h_{TA-OBU2}, h_{TA-OBU3}$ ). Si bien es cierto que, el valor de  $g$  y  $p$  son conocidos por todos los miembros de la red VANET, los valores que se utilizan para autenticar la identidad de la *OBU* son  $h_{TA-OBU1}, h_{TA-OBU2}, h_{TA-OBU3}$  y se asume que esa información se encuentra almacenada de manera segura. A pesar que un atacante pueda obtener el valor de  $h_{OBU}$  debido a que es

enviado en texto claro sobre un canal abierto, el atacante no podrá engañar a la TA porque no conoce los otros valores para demostrar que es la víctima.

- Robo de identidad. En caso que un atacante o usuario mal intencionado desee realizar el ataque de robo de identidad, se verá limitado al no poder conseguir la información almacenada en la OBU ( $h_{TA-OBU1}$ ,  $h_{TA-OBU2}$ ,  $h_{TA-OBU3}$ ). Se recuerda que dicha información se encuentra oculta mediante el uso de operaciones or-exclusiva y funciones *hash*.
- Reenvío de información. En caso que un atacante o usuario mal intencionado decida utilizar mensajes enviados por la víctima en ocasiones pasadas, se encontrará limitado por el tiempo de validez de la clave de sesión *R*.
- Hombre en medio. En caso que un atacante o usuario mal intencionado decida escuchar el canal de comunicación, solo podrá conocer el valor de  $h_{OBU}$  al iniciar el proceso para establecer un canal de comunicación seguro.

## 7. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se ha presentado un protocolo de autenticación mutua entre OBU-RSU basado en el algoritmo Diffie-Hellman y operaciones de bajo costo. En la propuesta, se establece un canal de comunicación a través del algoritmo Diffie-Hellman. Ese proceso es posible porque la OBU ha sido registrada previamente ante la autoridad correspondiente y entre los parámetros de seguridad recibidos, se encuentran  $g$  y  $mod\ p$ . Con la clave de sesión conocida por OBU y RSU, se puede cifrar información sensible por medio de un canal de comunicación abierto. La información sensible que intercambian OBU y RSU son los parámetros de seguridad entregados a la OBU en el proceso de registro. El proceso de verificación de la identidad de la OBU es delegada a la TA. La TA es la encargada de validar que, la OBU sea legítima en el sistema. Para llevar a cabo el proceso de verificación mutua, TA y OBU calculan operaciones XOR y funciones hash.

El análisis de seguridad ha demostrado que la propuesta es segura ante ataques conocidos y cumple con requisitos de seguridad, tales como: realizar autenticación mutua y generar una clave de sesión

Como trabajo futuro, se realizará un análisis de rendimiento y de tiempo de ejecución para conocer el beneficio de la propuesta en esa dirección.

## **8. Bibliografía y Referencias**

- [1] INEGI, Estadísticas a propósito del día mundial en recuerdo de las víctimas de los accidentes de tráfico. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes. 2015.
- [2] O. Orozco, D. Chavarro, O. Calderón, "Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular". *Entre Ciencia e Ingeniería*. Vol. 8. No. 15. 2014. Pp. 62-70.
- [3] O. J. Calderón, V. M. Quintero, "Un nuevo aspecto de la movilidad: redes ad hoc – conceptos". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Vol. 1. No. 3. 2014. Pp. 59-64.
- [4] P. Fernandes, U. Nunes, *Vehicle Communications: a short survey*. IADIS Telecommunications, Networks and Systems. 2007. Pp. 134-138.
- [5] M. Raya, J. Hubaux, *The security of vehicular ad hoc networks*. Third ACM Workshop on Security of Ad Hoc and Sensor Networks, Alexandria, VA, USA. 2005.
- [6] V. S. Brijesh Chaurasia, "Infrastructure based Authentication in VANETs". *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. Vol. 6. No. 2. April 2011. Pp. 8-9.
- [7] A. Perrig, R. Canetti, J.D. Tygar, D. Song, "The TESLA Broadcast Authentication Protocol". *RSA CryptoBytes*. Vol. 5. No. 2. 2005. Pp. 2-13.
- [8] Y. Xi, K. Sha, W. Shi, L. Schwiebert, T. Zhang, "Enforcing Privacy Using Symmetric Random Key-Set in Vehicular Networks". *Eighth International Symposium on Autonomous Decentralized Systems*. 2007. Pp. 344 – 351.
- [9] W. Diffie, M. Hellman, "New direction in cryptography". *IEEE Transactions on Information Theory*. Vol. 22. Nº 6. 1976. Pp. 644-654.

- [10] R. Housley, A 224-bit one-way hash function: SHA-224. Internet Engineering Task Force. 2004.
- [11] J. Fuentes, L. Gonzalez-Manzano, A. Gonzalez-Tablas, J. Blasco, "Security models in Vehicular ad-hoc networks: a survey". IETE Technical Review. Vol. 31. No. 1. 2014. Pp. 47-64.
- [12] S. Sesay, Z. Yang, J. He, "A Survey on Mobile Ad Hoc Wireless Network". Information Technology Journal. Vol. 3. No. 2. 2004. Pp. 168-175.
- [13] R. Ramanathan, J. Redi, "A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions". IEEE Communications Magazine. Vol. 40. No. 5. 2002. Pp. 20-22.
- [14] X. Liu, Z. Fang, L. Shi, "Securing vehicular ad hoc networks". Second International Conference on Pervasive Computing and Applications. 2007. Pp. 424-429.

## **9. Autores**

Julio César Betancourt Saucedo es egresado de la ingeniería en sistemas computacionales de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Sus áreas de interés son seguridad en redes vehiculares y redes.

Rafael Martínez Peláez es doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña e ingeniero en sistemas computacionales por la Universidad del Valle de México en 2003 y 2010, respectivamente. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad de la Salle Bajío y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) con el nombramiento de candidato. Sus áreas de interés son autenticación, seguridad en servicios electrónicos, y privacidad en redes sociales.

Pablo Velarde Alvarado es doctor y maestro en ciencias por el Centro de Investigación y de Estudios Avanzado del IPN e ingeniero en electrónica por la Universidad Autónoma de Guadalajara en 2009, 2001 y 1993, respectivamente. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Autónoma de Nayarit y miembro del cuerpo académico de nuevas tecnologías aplicadas a la educación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) con el nombramiento de nivel I.



Joel Ruiz Ibarra es doctor y maestro en ciencias por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada e ingeniero en electrónica por el Instituto Tecnológico de Sonora, en 2011, 2006 y 2004, respectivamente. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo en la Universidad Estatal de Sonora y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI.) con el nombramiento de candidato. Sus áreas de interés son protocolos de comunicaciones y redes inalámbricas de sensores.

Yesica Imelda Saavedra Benítez es doctora por la Universidad de Versalles e ingeniera en computación por el Instituto Tecnológico de Toluca en 2013 y 1997, respectivamente. Actualmente, es profesora de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Toluca y directora del laboratorio de investigación. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) con el nombramiento de candidato. Sus áreas de interés son redes inalámbricas ad-hoc, redes de sensores y seguridad en redes inalámbricas.

# ALGORITMO DE CIFRADO SIMÉTRICO BASADO EN MAPEO LOGÍSTICO Y TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

**Francisca Angélica Elizalde Canales**

Universidad politécnica de Tulancingo

*Francisca.elizalde@upt.edu.mx*

**Iván de Jesús Rivas Cambero**

Universidad politécnica de Tulancingo

*Ivan.rivas@upt.edu.mx*

## Resumen

Las herramientas estadísticas utilizadas en la criptografía desde la antigüedad hasta nuestros días, son muy útiles en el criptoanálisis de sistemas de cifrado dado que ofrecen un buen instrumento para la identificación del sistema de cifrado utilizado en un criptograma. Los algoritmos criptográficos son cada vez más necesarios para garantizar la confidencialidad de los datos en la transmisión de forma segura a través de canales de comunicación inseguros.

En éste trabajo se presenta un algoritmo de cifrado simétrico, cuya implementación está basada en el acoplamiento de mapeo logístico, un generador congruencial lineal, y la transformada rápida de Fourier. Como parte del proceso se generan subclaves de cifrado a través de una semilla extraída de una zona caótica para aumentar su nivel de aleatoriedad. Se realiza un análisis al criptograma, en particular, con pruebas estadísticas sobre datos cifrados, con el fin de determinar su impredecibilidad en secuencias generadas, evaluando las propiedades de independencia y aleatoriedad. Se obtienen resultados en simulación que muestran una notable distorsión en los datos cifrados con respecto a los originales, que, en términos de seguridad, disminuye su vulnerabilidad ante ataques externos.

**Palabra(s) Clave(s):** Algoritmo de cifrado, criptograma, descifrado, pruebas estadísticas.

## 1. Introducción

El uso de pruebas estadísticas en la criptografía parece que se remontan al primer milenio después de Cristo, debido a Abu Yaqub Yusuf Ibn Ishaq al-Sabah Al-Kindi (801-873), que fue un pionero en el criptoanálisis y criptología [1], se le atribuye el desarrollo de un método en el que se podría analizar las variaciones en la frecuencia de la aparición de cartas y utilizarlo para romper el cifrado; es decir criptoanálisis por análisis de frecuencias. Más tarde, en 1863, Friedrich Kasiski publicó un libro, que fue el primer relato divulgado de un procedimiento para atacar cifras de sustitución polialfabéticos, especialmente el sistema de cifrado de Vigenère, cuyo método se basó en el análisis de las diferencias entre los fragmentos repetidos en el texto cifrado; este tipo de análisis puede dar pistas sobre la longitud de la clave utilizada [2]. Posteriormente, durante la Segunda Guerra Mundial, se transmitieron códigos secretos a través de redes de comunicaciones de radio que usaban códigos formales e informales desarrollados en sus lenguas maternas [3].

Hoy día es imprescindible implementar mecanismos de seguridad que permitan resguardar los datos sensibles ante algún ciberataque, dado el avance tecnológico que ha propiciado el incremento del uso sistemas de información, lo que ha generado vulnerabilidad a ataques cibernéticos, siendo la criptografía uno de los mecanismos de protección más utilizados, debido a que se encarga de ocultar los datos ante terceros, proporcionando confidencialidad mediante algún método de cifrado [4].

Bajo la consideración de que, el caos es un comportamiento de un sistema dinámico que cambia de manera irregular en el tiempo, muchos métodos o esquemas de comunicación segura se han desarrollado para cifrar información basándose en sistemas discretos caóticos [5]. Existe una relación cercana entre el caos y la criptografía porque los sistemas caóticos tienen características de ergodicidad, propiedades de mezcla, sensibilidad en los parámetros y en las condiciones iniciales, que pueden considerarse análogos a las técnicas de difusión y confusión, integrados en muchos sistemas criptográficos [6,7].

La criptografía ha sido aplicada en varios sectores críticos donde se requiere reforzar la seguridad cibernética, un ejemplo es el sector de la energía eléctrica, que se vuelve cada vez más vulnerable debido a que, en una red eléctrica inteligente además de la conexión con generación, transmisión y distribución, también se incluyen a los consumidores, todos ellos interconectados bajo las tecnologías de la comunicación y la información, proporcionada esta interacción por medio de medidores inteligentes que podrían exhibir accesos no autorizados a la privacidad del consumidor, lo que se convierte en una preocupación en el manejo de información para adopción de redes inteligentes ante la posibilidad cada vez mayor de ataques cibernéticos [8,9].

En [10] proponen una infraestructura de privacidad amigable para conservar la confidencialidad en el consumo de energía eléctrica por medio de un algoritmo criptográfico que no expone el patrón de consumo de energía así como la identidad de los consumidores, basado en el esquema de compartición de secretos de Shamir que permite ocultar información con el fin de preservar la privacidad de los consumidores. Para mantener la seguridad con demandas computacionales bajas, en [11] hacen uso de diferentes variantes de la transformada Wavelet en combinación con cifrado selectivo para permitir a los consumidores denegar el acceso a diferentes datos.

Para abordar el problema de inseguridad, [12] presentan una distribución gradual en el que agregan cifrado homomórfico a los medidores inteligentes implicados en el envío de datos, desde la fuente hasta la unidad de recolección para garantizar que los resultados intermedios no sean revelados a cualquier dispositivo en la ruta. La historia de la criptografía nos da pruebas de que puede ser difícil mantener en secreto los detalles de un algoritmo usado extensamente, siendo una clave más sencilla de proteger, que todo un sistema de cifrado, y es más fácil de substituir si ha sido descubierta. Al diseñar un sistema de seguridad, es recomendable asumir que los detalles del algoritmo de cifrado ya son conocidos por el hipotético atacante, como se enuncia en el Principio de Kerckhoff [13], sólo el mantener la clave en secreto proporciona seguridad.

El objetivo de realizar un cifrado, es el de dificultar o imposibilitar la comprensión de la información a personas ajenas [14]. Shannon, denominado el padre de la teoría de la información [15], determina la entropía como la incertidumbre de una fuente de información. Cuanto mayor sea la entropía aumenta la impredecibilidad de los datos. El concepto de entropía basado en la teoría de la información es en realidad la medida de la inconsistencia, los datos no estructurados o la aleatoriedad de las variables, siendo menos vulnerable cuanto más entropía contenga [16,17].

En este trabajo se realiza una valoración estadística, a un algoritmo criptográfico simétrico, que tiene como propósito fortalecer la protección de la privacidad de los datos adquiridos y procesados por la simulación de un dispositivo de medición de energía eléctrica, buscando mejorar la seguridad de los datos enmascarando éstos ante posibles ataques mal intencionados. El algoritmo se conforma de tres técnicas: mapeo logístico, acoplado con generador congruencial lineal con el propósito de maximizar la imprevisibilidad de la secuencia de cifras aplicado como primera etapa de cifrado y posteriormente la transformada rápida de Fourier para incrementar la técnica de confusión. En la sección de resultados se presentan las representaciones obtenidas con el algoritmo al aplicarlo para codificar una serie de datos de consumo de energía eléctrica, donde se puede apreciar el comportamiento de los datos después de ser alterados por el algoritmo de cifrado propuesto.

## **2. Técnicas**

A continuación, se refieren las técnicas utilizadas para el diseño del algoritmo de cifrado simétrico, dadas sus características computacionales, en donde se incluye mapeo logístico como generador de semilla, generador congruencial para generar subclaves, y transformada rápida de Fourier para aumentar la confusión. Consiguiendo con los dos primeros robustecer la clave, dado que la fortaleza de la criptografía reside en la elección de las claves, las cuales son parámetros secretos y no debe haber posibilidad de que un intruso pueda inferirla.

## Mapeo logístico

El caos muestra que un comportamiento complejo puede aparecer de reglas deterministas simples cuando no hay linealidad. Dado que los mapas caóticos son capaces de generar señales de aspecto estocástico y las implementaciones prácticas basadas en sistemas caóticos son más simples que las requeridas para sistemas estocásticos es natural que se proponga utilizar el caos como generador de ruido en diversas aplicaciones. La aplicación logística ha sido usada como generador de números pseudo-aleatorios. Para este fin en [18], han realizado ciertas pruebas estadísticas sobre las series de números obtenidas de sistemas dinámicos discretos y han encontrado que cumplen satisfactoriamente y por tanto posee muchas de las propiedades requeridas por un generador de números pseudo-aleatorios.

El mapeo logístico, puede presentar una dinámica muy amplia, variando el valor de un parámetro, se pueden tener trayectorias que tienden a un punto fijo, que son periódicas o bien caóticas. Este sistema dinámico, es uno de los modelos discretos más simples utilizado para el estudio de la evolución de población en sistemas cerrados, que viene dado por ecuación 1 [19].

$$x_{t+1} = \mu x_t(1 - x_t) \quad (1)$$

Donde  $\mu$ , es una constante, llamada parámetro de control, que determina el grado de no-linealidad del mapa, y  $x_t$ , es la variable de estado que determina la secuencia  $(x_0, x_1, x_2...)$  de la trayectoria u orbita correspondiente a la condición inicial  $x_0$ . En el que la constante  $\mu$  varía entre  $0 < \mu < 4$ . El espacio de fases del sistema es en el intervalo  $[0,1]$ . Los sistemas dinámicos discretos evolucionan en el tiempo por el proceso de iteración, en el que el siguiente estado del sistema viene determinado por su estado actual. El comportamiento de la ecuación (1): bajo los parámetros de  $\mu$  y  $x_t$ : cuando  $0 \leq \mu \leq 4$ , y  $0 \leq x_t \leq 1$ . Cuando,  $x_1 = f(x_0)$ ,  $x_2 = f(x_1) = f_2(x_0)...$   $x_t = f(x_{t-1}) = f_t(x_0)$ , donde  $x_t$ , es la nueva iteración de  $x_0$  y el conjunto de todas las iteraciones es el mapeo de la función  $f$  que forma una parábola. Se dice que sus características dinámicas son universales. Ejemplos de estos rasgos son la sensibilidad a las condiciones iniciales, la ruta al caos por duplicación de periodo o el fenómeno de la intermitencia.

## Generador Congruencial

La generación de números pseudo-aleatorios juega un papel crítico en gran número de aplicaciones tales como, simulaciones numéricas, las comunicaciones o la criptografía, dado que permite generar secuencias de números con algunas propiedades de aleatoriedad. Las principales ventajas de tales generadores son la rapidez y la repetitividad de las secuencias pseudo-aleatorias producidas. En la práctica, la generación de números pseudo-aleatorios no es trivial y la calidad aleatoria de las secuencias producidas puede ser esencial en la elección de su aplicación [20].

El generador de congruencia lineal, es uno de los generadores más antiguos y sencillos es propuesto por Lehmer en 1949, que consiste en, a partir de un número inicial llamado semilla, generar una secuencia por recurrencia; ecuación 2.

$$X_{n+1} = (aX_n + c) \bmod m \quad (2)$$

Donde debe tenerse en cuenta que los valores  $a$ ,  $X_n$  y  $c$  tienen que ser mayores que cero y, la variable  $m$ , tiene que ser un número primo suficientemente mayor que los tres anteriores.

Este tipo de generador es computacionalmente rápido y de fácil implementación; sin embargo, posee propiedades no tan ideales, como la producción de secuencias de valores que se repiten con un período máximo de  $m-1$ , sin embargo, las secuencias producidas por un generador congruencial lineal son muy sensibles a cambios en sus parámetros, lo cual es una propiedad útil [21,22].

## Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier, un método matemático para la transformación de una función del dominio del tiempo al dominio de frecuencia. Es un eficiente algoritmo que permite calcular la transformada de Fourier discreta y su inversa. Siendo uno de los algoritmos aritméticos ampliamente utilizados, debido a su eficiencia en cuanto al tiempo de cómputo para grandes arreglos de entrada cuya longitud es una potencia entera de dos. La transformada de Fourier de una señal en tiempo discreto se calcula mediante ecuación 3.

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad (3)$$

Y su inversa ecuación 4.

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X \cdot e^{j\omega n} d\omega \quad (4)$$

La cual proporciona un medio oportuno para mejorar el rendimiento de los algoritmos para un conjunto de problemas aritméticos comunes [23].

Dichos métodos se implementan en el algoritmo de cifrado dadas sus características, como son la velocidad de procesamiento y el bajo costo en términos de recursos computacionales. El generador lineal, posee gran sensibilidad a cambios en sus parámetros, además de rapidez para generar números pseudoaleatorios, sin embargo, presenta cierta vulnerabilidad a los ataques de fuerza bruta; para evitar tal inconveniente se acopla con un sistema para la generación de números pseudoaleatorios a través de la aplicación caótica, capaz de generar de forma recursiva números impredecibles, con un bajo costo en recursos y resistente a los ataques externos, con posibilidad de generar secuencias de números con características de aleatoriedad altas. Con el fin de aportarle robustez al sistema de criptográfico, se hace uso de la transformada rápida de Fourier, la cual ofrece un seguro, eficiente y rápido flujo de información, debido a la gran velocidad que posee para procesar datos.

### 3. Experimentación

Para el diseño del algoritmo se recurre a las tres técnicas señaladas en la sección anterior, haciendo un acoplamiento del mapeo logístico con el generador congruencia lineal, dadas las características de ambos se complementan para aumentar la imprevisibilidad de la clave de cifrado, y se mejora la seguridad de encriptado agregando la transformada rápida de Fourier para dificultar la intrusión a los datos. Las tres técnicas presentan gran eficiencia en cuanto a rendimiento de cómputo.

Dentro de los sistemas discretos caóticos uno de los más utilizados para codificar información es el mapa logístico debido a su sencillez, rapidez y sensibilidad a



condiciones iniciales y parámetro de control [22,24]. En nuestro caso de estudio la variable  $x_t \in (0,1)$  y  $\mu \in (3.85, 4)$  para estar dentro de la zona de caos [25].

Como puede apreciarse en la figura 1, el sistema presenta bifurcación de periodo con  $\mu$  cercano a 3, de este punto en adelante la bifurcación de periodo es cada vez más frecuente generando comportamiento caótico. En la figura se señala con un rectángulo el área que será aprovechada en este caso.

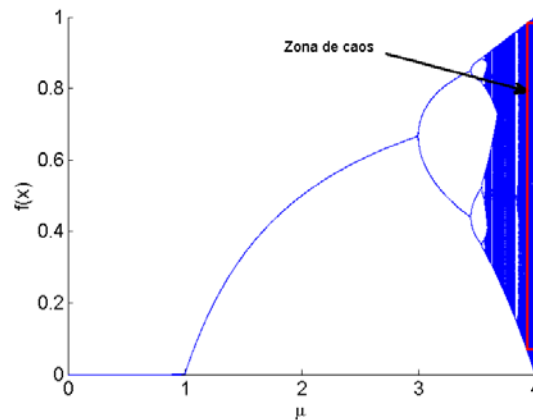


Figura 1 Diagrama de bifurcación del mapeo logístico.

Para garantizar secuencias impredecibles, es necesario utilizar una semilla que se encuentre dentro de la zona en que el sistema se comporta de forma inestable. Por éste motivo se utilizarán los resultados obtenidos en donde se muestra el análisis dinámico de generadores caóticos, evaluándolos a través de los exponentes de Lyapunov, con el fin de delimitar el rango del parámetro que muestre un comportamiento impredecible. En donde el exponente de Lyapunov cuantifica el grado de inestabilidad local en un espacio de estados mediante ecuación 5.

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \ln |f'(x_i)| \right\} \quad (5)$$

Que puede definirse como el promedio del logaritmo natural del valor absoluto de las derivadas de la función del mapeo evaluadas en los puntos de la trayectoria [6]. El horizonte de predecibilidad de un sistema es caótico, es temporalmente limitado. El límite está asociado con su exponente positivo de Lyapunov. La secuencia temporal, generada a partir de una de sus trayectorias caóticas, no

puede comprimirse por un factor arbitrario, es decir es algorítmicamente compleja. En un sistema caótico, una pequeña perturbación produce una separación, creciente con el tiempo, entre una trayectoria y la misma perturbada. Se tiene de esta manera una rápida amplificación (exponencial) de un error en las condiciones iniciales. Por el contrario, una trayectoria regular puede comprimirse fácilmente.

La tabla 1, muestra un resumen de los rangos seguros del parámetro y condiciones iniciales en los que la ecuación logística presenta y mantiene temporalmente comportamiento caótico.

Tabla 1 Rangos seguros del parámetro y condiciones iniciales.

Ecuación logística	Parámetro	Condición inicial
$x_{t+1} = \mu x_t(1 - x_t)$	$3.96 < \mu < 4$	$0 < x_t < 1$

Con este parámetro y condiciones iniciales se generan series de números impredecibles que son utilizados como semilla para complementar la llave de cifrado aplicando la técnica de confusión que consiste en ocultar la relación entre la información original, la cifrada y la clave.

La figura 2 muestra un diagrama de bloques del algoritmo compacto propuesto, que incluye los procedimientos que integran el encriptado completo y sus etapas que implican el desarrollo de encriptación.

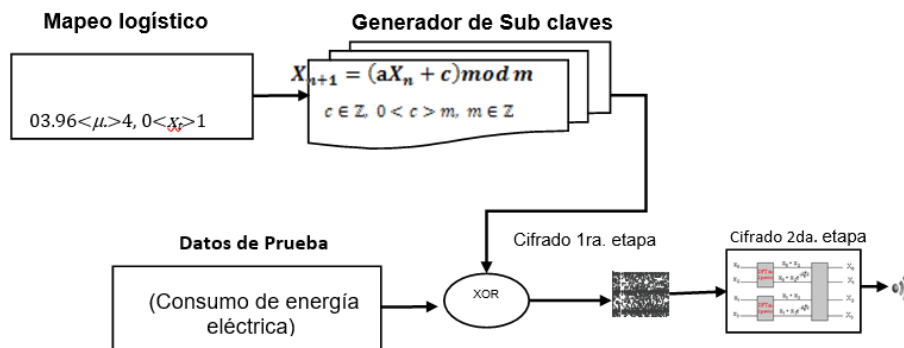


Figura 2 Diagrama de bloques del algoritmo de encriptación.

En el bloque de la señal eléctrica, se adquieren las señales de voltaje y corriente y la obtención del consumo de energía, datos que serán encriptados. El bloque

generador de sub-claves representa el procedimiento a seguir para generar una semilla con números impredecibles a través de mapeo logístico unidimensional; localizada una zona caótica que mantenga temporalmente el comportamiento de inestabilidad siendo esta zona evaluada por el exponente de Lyapunov; de la serie de números impredecibles obtenidos, se selecciona aleatoriamente uno de ellos el cual sufrirá una trasposición geométrica y, se fusiona con un generador de números pseudoaleatorios para obtener las subclaves, que encriptarán los datos a través del operador lógico de disyunción exclusiva Xor, con una señal de consumo de energía eléctrica y con ello se genera la primera etapa del diagrama de proceso de encriptación [26].

Con el propósito de fortalecer los datos encriptados en la primera etapa, se aplica un procedimiento iterativo, que incluye una mejora aleatoria con la compensación de la técnica de transformada rápida de Fourier como segunda etapa, representada bajo ecuación 6.

$$X(w_k) = X(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-j(2\pi k/N)n} \quad (6)$$
$$k=0, 1, \dots, N-1$$

Finalmente se obtienen, los datos totalmente enmascarados y preparados para ser enviados de forma inalámbrica por algún canal probablemente inseguro.

Una vez que se reciben los datos enviados, estos deben ser descifrados con la clave de cifrado y el uso de un algoritmo de recuperación; el cual realiza la operación reversible para reconstruir el mensaje de los datos recibidos. Siendo el proceso de descifrado muy similar al cifrado, excepto porque se aplican los métodos de manera inversa.

#### 4. Resultados

Se evalúa estadísticamente un algoritmo que tiene como propósito fortalecer la seguridad en datos generados por medio de un dispositivo de medición de consumo de energía eléctrica, buscando mantener el equilibrio entre la seguridad y el rendimiento, sin comprometer el costo en términos de recursos computacionales. El algoritmo está conformado por la fusión de las técnicas antes

mencionadas, debido a su facilidad y alto rendimiento en esta clase de procesos, añadiendo pruebas para su desarrollo y compilación que permiten el análisis de resultados.

### Análisis al criptograma

Para evaluar el algoritmo de cifrado propuesto previamente, el cual está enfocado para trabajar con medición de datos de energía eléctrica en el marco de las redes inteligentes; se desarrolla un circuito de prueba de corriente alterna a 60 Hz, en el que se mide el voltaje y la corriente para calcular la potencia, y con ello la energía que consume una carga resistiva. En la figura 3, se presenta la curva de consumo de energía eléctrica obtenida, cuando la carga resistiva es de 144Ω. Para este caso demostrativo, solo se presenta el consumo de energía en el trascurso de un tiempo de 10 segundos. En la figura 3, se muestra la señal de los datos originales antes de aplicar el algoritmo de cifrado, y en esta figura se sobrepone la señal recuperada (descifrada) después del proceso.

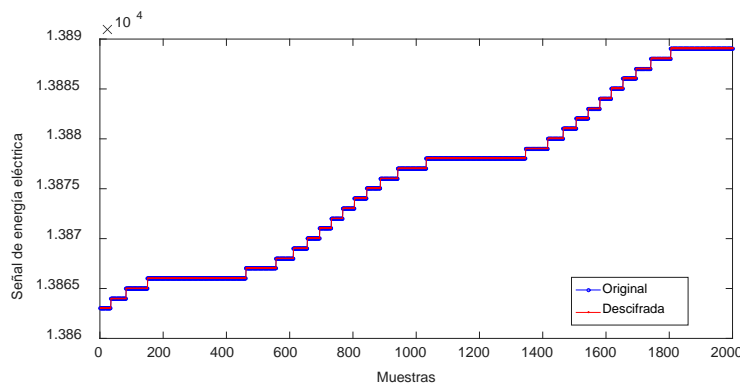


Figura 3 Señal de energía eléctrica original y señal descifrada.

Tanto en las figuras 3 y 4 puede apreciarse, el comportamiento de la señal original, que representa el consumo de energía, y su equivalente cifrada, respectivamente, esta última presenta un comportamiento con variación en la señal una vez que es afectada por el algoritmo de cifrado, en sus propiedades básicas (frecuencia, amplitud), tendiendo a parecerse a una señal de ruido.

En la figura 4, se presenta la señal cifrada usando el algoritmo propuesto en esta sección; utilizando como clave de cifrado la misma que para descifrado (simétrico),

empleando como semilla una serie de números impredecibles inútiles para un supuesto atacante.

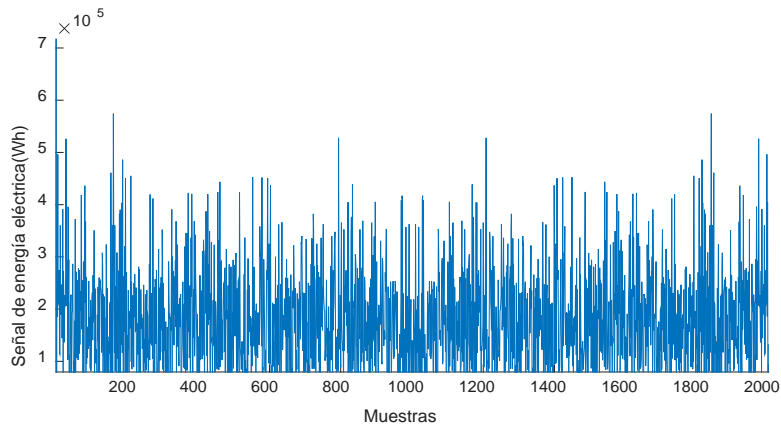


Figura 4 Señal cifrada con el algoritmo propuesto.

Se realiza un análisis bajo herramientas estadísticas, para valorar las características de independencia, distribución y correlación entre la sucesión de datos cifrados. Se realiza un análisis de correlación donde se mide la asociación lineal entre los datos originales y los datos cifrados, posteriormente se realiza la correlación con los datos cifrados y los descifrados, con la finalidad de determinar si existe alguna pérdida de información al utilizar el algoritmo; las métricas se concentran en la tabla 2.

Tabla 2 Concentrado de métricas estadísticas al criptograma.

Métricas estadísticas	
Coefficientes de correlación	-0.0251
Entropía	3.5156e+12
Desviación estándar	4.7287e+03
Media	8.5264e+03
Mediana	8.6835e+03
Varianza	2.2360e+07
Corrida ascendente y descendente	0
Información mutua normalizada	0.6098

### Coefficientes de correlación

Con el fin de obtener medidas numéricas se calcula el coeficiente de correlación con ecuación 7.

$$c = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (7)$$

Donde, n es el número de elementos en los dos vectores adyacentes x y y. Para datos fuertemente encriptados, los coeficientes de correlación se deben aproximar a cero [26, 27].

## Histogramas

En las figuras 5 y 6, se muestra la distribución de los valores tanto en la señal original como en la señal cifrada, respectivamente. En el primer caso el histograma exhibe en el eje horizontal los valores de la señal en el rango de 13865 a 13890, donde, las barras más altas indican los valores que se repiten con mayor frecuencia. Por otra parte, en el segundo caso, el histograma de la señal cifrada, con el algoritmo propuesto, en el eje horizontal presenta valores de 0 a 16000.

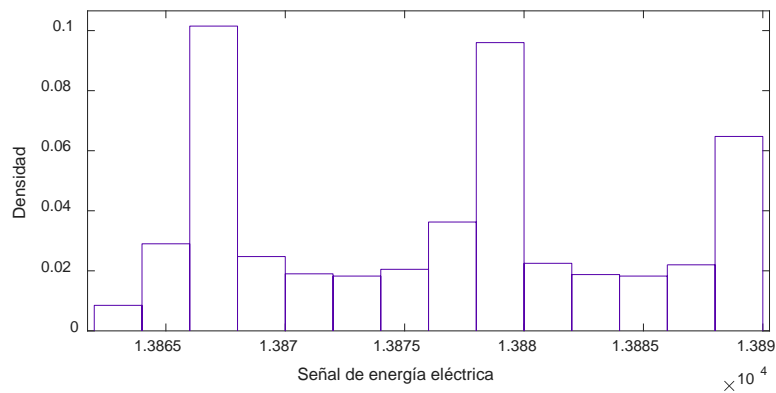


Figura 5 Histograma de señal original.

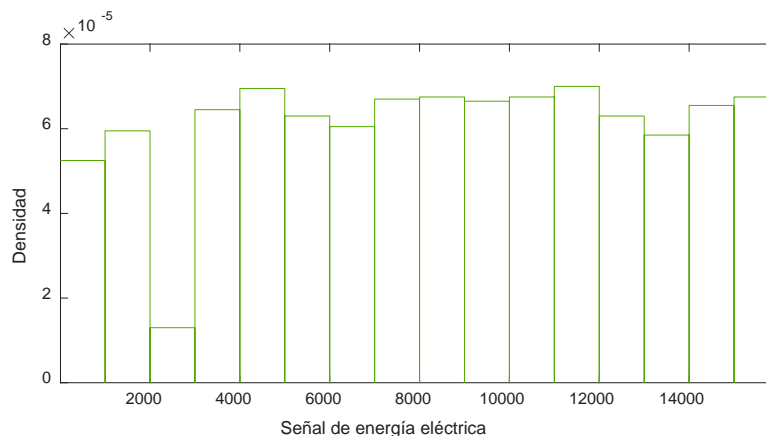


Figura 6 Histograma de señal cifrada.

Al comparar ambos histogramas de las figuras 5 y 6, se observa que tienen diferente distribución en las frecuencias de la señal original respecto a la señal cifrada, mostrando rangos diferentes en el eje horizontal, lo cual, aumenta la dificultad al posible atacante para analizar y descifrar los datos codificados.

## Entropía

La entropía mide la incertidumbre de una fuente de información calculando la aleatoriedad de los datos, lo que permite evitar cualquier previsibilidad, así como también se mide la independencia entre variables a través de la información mutua normalizada. La entropía está dada por ecuación 8.

$$H = \sum_{i=1}^n P(S_i) \log_2 P(S_i) \quad (8)$$

Donde H, representa (entropía de Shannon) la sorpresa de un evento o su nivel de incertidumbre, S, un símbolo y P la probabilidad de aparición de éste. Se considera que, entre más alto es el valor de H, más inesperado se hace la ocurrencia de dicho evento, en otras palabras, se torna más aleatorio e impredecible [17].

La teoría de la información de Shannon permitió la caracterización estadística de fuentes deterministas caóticas. Estos esfuerzos para describir la impredecibilidad de sistemas dinámicos condujeron a la definición de cantidades tales como la entropía métrica y los exponentes de Lyapunov que pueden emplearse para detectar la presencia y para cuantificar el comportamiento caótico determinista. Un sistema periódico produce un conjunto de puntos. Un sistema en que un estado es función de los anteriores produce una curva. Un sistema aleatorio produce una nube de puntos. Para mostrar que los resultados simulados demuestran viabilidad y seguridad del algoritmo propuesto, se emplean pruebas estadísticas de distribución, dispersión, correlación, histogramas y entropía; se comprueba que efectivamente los datos que se obtienen provienen de secuencias con alto grado de aleatoriedad; con lo cual se dificulta para un atacante determinar algún orden en los datos, por lo que el cifrado se puede considerar válido y confiable.

En la tabla 2, se muestra el comportamiento de la señal resultante después del proceso de cifrado y los valores resultantes en base a la evaluación aplicada

donde las propiedades importantes esperadas son uniformidad e independencia en los datos cifrados.

El criptograma muestra una distribución uniforme de los datos, sin asociación entre las variables, el coeficiente de correlación indica que no hay correlación al estar muy cercano a cero, La entropía es equivalente al “desorden”, así que, si aumenta la entropía, significa que creció el desorden. Dado el resultado de corridas ascendentes y descendentes se acepta la aleatoriedad.

Si bien existen en la literatura bancos de prueba de propósito general para la evaluación de generadores de números pseudoaleatorios, no están diseñados tomando en cuenta las características particulares de los mapas caóticos, la naturaleza determinista del caos deja su marca en la serie temporal y deben buscarse cuantificadores adecuados para descubrir esa firma.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se presenta una evaluación estadística a un nuevo algoritmo de cifrado, el cual combina el comportamiento impredecible de una función logística, usada para obtener subclaves a partir de una semilla y un generador de números pseudoaleatorios, ambos mezclados con la transformada de Fourier para agregar la técnica de confusión al cifrado. El algoritmo se implementa en Matlab para apreciar el proceso de cifrado y descifrado y sobre todo evaluar la aleatoriedad, usando diferentes herramientas estadísticas.

Las pruebas aplicadas al algoritmo se desarrollan bajo la consideración de cifrar un conjunto de datos que representan el consumo de energía eléctrica, obtenidos por la simulación de la adquisición de las variables eléctricas que puede entregar un medidor inteligente, bajo el contexto de las redes inteligentes, conocidas como Smart Grid, donde se busca aumentar la confidencialidad de los datos implicados durante el proceso de medición y transmisión por medios inseguros de comunicación, entre dispositivo de medición, usuario y proveedor.

La información presentada en este artículo forma parte de un proyecto mayor, en donde se está desarrollando un prototipo de medición de consumo de energía eléctrica en el que se implementará el algoritmo propuesto, en este sentido, se



requiere hacer una evaluación de las demandas computacionales y los tiempos de ejecución en hardware para desarrollar la etapa de implementación.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1.] S. Singh, *The Code Book: The Science of Secrecy from Ancient Egypt to Quantum Cryptography*. 1999. Anchor Books.
- [2.] D. Kahn, *The Codebreakers - The Story of Secret Writing*. 1996. revised ed. Scribner.
- [3.] N. Aaseng, *Navajo Code Talkers: Americas Secret Weapon in World War II*. 1992. Walker & Company. New York.
- [4.] M. Mogollon, *Cryptography and security services: mechanisms and applications*. 2007. Hershey, PA: CyberTech. Pp. 51-97.
- [5.] B. Rajan, P. Saumitr, "A novel compression and encryption scheme using variable model arithmetic coding and coupled chaotic system". *IEEE Transactions on circuits and system*. Vol. 4. 2006. Pp. 1- 53.
- [6.] M. Jiménez, F. Flores, G. González, "System for Information Encryption Implementing Several Chaotic Orbits". *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. Vol. 16. Issue 3. 2015. Pp. 335-343.
- [7.] Radwan, S. AbdElHaleem, S. Abd-El-Hafiz, "Symmetric encryption algorithms using chaotic and non-chaotic generators: A review". *Journal of Advanced Research*. Vol. 7. No. 2. 2016. Pp. 193–208.
- [8.] F. Li, B. Luo, P. Liu, "Secure information aggregation for smart grids using homomorphic encryption". *First IEEE international conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Pp. 327–332.
- [9.] Kerckhoffs, "La cryptographie militaire, *Journal des sciences militaires*". Vol. 9. 1983. Pp. 161-191.
- [10.] Rottondi, G. Verticale, "Privacy-friendly load scheduling of deferrable and interruptible domestic appliances in Smart Grids". *Computer Communications*. Vol. 58. No. 1. 2015. Pp. 29–39.
- [11.] Engel, *Wavelet-based load profile representation for smart meter privacy. Innovator Smart Grid Technologies (ISGT), IEEE PES*. 2013. Pp. 1-6.

- [12.] McKenna, I. Richardson, M. Thomson, "Smart meter data: Balancing consumer privacy concerns with legitimate applications". *Energy Policy*. Vol. 41. 2012. Pp. 807-814.
- [13.] S. Zeadally, A. S.K. Pathan, C. Alcaraz, M. Badra, "Towards privacy protection in smart grid". *Wireless personal communications*. Vol. 73. No. 1. 2013. Pp. 23-50.
- [14.] H. Hennawy, A. Omar, S. Kholaf, "LEA: Link Encryption Algorithm Proposed Stream Cipher Algorithm". *Ain Shams Engineering Journal*. Vol. 6. No. 1. 2015. Pp. 57-65.
- [15.] Shannon, A mathematical theory of communication. 1948. *Bell Syst. Tech.* Pp. 27, 379-423, 623-656.
- [16.] S. Kumar, K. Abhishek, M. Singh, "Accessing Relevant and Accurate Information using Entropy". *Procedia Computer Science*. 2015. Pp. 54, 449-455.
- [17.] Shannon, Teoría de la Comunicación de Secrecy Systems. *Bell Tech System*. Vol. 28. 1949. Pp. 656-715.
- [18.] Rao Logistic Map: A Possible Random Number Generator. <http://arXiv.org/abs/cond-mat/9310004v1>
- [19.] R. May, Simple Mathematical Models with Very Complicated Dynamics, *Nature*. 1976. Pp. 261, 459-467.
- [20.] M. François, T. Grosge, D. Barchiesi, R. Erra, "Pseudo-random number generator based on mixing of three chaotic maps". *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. Vol. 19. No. 4. 2014. Pp.887-895.
- [21.] D.H. Lehmer, "Mathematical methods in large-scale computing units". 2<sup>nd</sup> symposium on large-scale digital calculating machinery, cambridge, massachussets. 1949. Pp. 141-146.
- [22.] N. Pareek, V. Patidar, K. Sud, "Discrete chaotic cryptography using external key". *Physics Letters A*. Vol. 309. Issue 1-2. 2003. Pp. 75-82.

- [23.] J. Vilaridy, C. Torres, L. Mattos, "Encriptación de Imágenes Digitales Via Transformada Fraccional de Fourier Discreta y Transformada Jigsaw". *Revista Colombiana de Física*. Vol. 41. No. 2. 2009. Pp. 1-4.
- [24.] Y. Mao, G. Chen, and S. Lian, "A novel fast image encryption scheme based on 3d chaotic baker maps". *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol. 14. Issue 10. 2004. Pp. 3613-3624.
- [25.] R. Clark, *Dynamical systems: stability, symbolic dynamics, and chaos* CRC Press. 1995.
- [26.] B. Wichmann, I. Hill, "Generating good pseudo-random numbers". *Computational Statistics & Data Analysis*. Vol. 51. Issue 3. 2006. Pp. 1614-1622.
- [27.] Pavanello, W. Zaaiman, A. Colli, J. Heiser, S. Smith. "Statistical functions and relevant correlation coefficients of clearness index". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015. Pp. 130-131,142-150.

## **7. Autores**

Francisca Elizalde-Canales, estudiante de doctorado en Optomecatrónica, obtuvo título de Maestra en ciencias de la información y administración del conocimiento en el Instituto Tecnológico de Monterrey campus Hidalgo. Especialidad en Sistemas y Planeación y Licenciatura en Computación en Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Su área de interés es sobre el fortalecimiento de la ciberseguridad en sistemas de medición de energía eléctrica en el escenario de la red inteligente.

Iván Rivas-Camero, profesor investigador en el Área de Control y automatización obtuvo su título de Doctor en Ciencias con especialidad en Ingeniería Industrial en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; el título de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Cinvestav unidad Guadalajara. Su área de interés es sobre sistemas eléctricos inteligentes y control difuso.

# CATEGORIZACIÓN DE RESÚMENES DE PUBLICACIONES CIENTÍFICAS BASADA EN SIMILITUD SEMÁNTICA

***José Alejandro Reyes Ortiz***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*jaro@correo.azc.uam.mx*

***Maricela Claudia Bravo Contreras***

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco

*mcbc@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Los resúmenes de las publicaciones científicas se encuentran disponibles de manera abierta, es decir en repositorios con acceso libre. En el área de las ciencias computacionales, estos repositorios no están organizados con temáticas de dominio específicas, esto lleva a que una tarea de localización de una publicación de interés requiere de un trabajo exhaustivo por parte de las personas interesadas. En este artículo se describe un enfoque para la categorización de resúmenes de publicaciones científicas utilizando mediciones de similitud basadas en conocimiento semántico para obtener el grado de relación entre los textos. Una experimentación ha sido presentada en términos de Precisión, Exhaustividad y medida F, la cual muestra resultados prometedores para la categorización de resúmenes en el dominio de las ciencias computacionales.

**Palabra(s) Clave(s):** categorización de textos, medidas basadas en conocimiento, publicaciones científicas, similitud semántica.

## **1. Introducción**

En la actualidad, grandes cantidades de artículos científicos del área de las ciencias computacionales son publicados en repositorios, donde los resúmenes tienen un acceso libre y, en la mayoría de los casos, el resto del artículo tiene

acceso restringido. Los resúmenes de las publicaciones proporcionan la idea general, la aportación, la solución, el método, algoritmo, técnica, enfoque o herramienta para un problema específico. Existen varios sitios o repositorios sobre publicaciones, tales como:

- El sitio Google Académico<sup>1</sup> soportado por la empresa Google que contiene información sobre citas y perfiles especializada en literatura científica-académica.
- DBLP<sup>2</sup> es un sitio web, patrocinado por la Universidad de Trier, que ofrece un servicio para consultar información bibliográfica sobre revistas y memorias sobre el área de las ciencias computacionales.
- CiteSeerX<sup>3</sup> es una librería digital para publicaciones científicas y académicas, principalmente en los campos de la computación e informática, el cual incluye citas, documentos y estadísticas.

Estos repositorios no tienen una estructura semántica o una categorización temática de sus publicaciones. Sin embargo, ofrecen herramientas que hacen posible acceder a los resúmenes de publicaciones científicas mediante el uso de buscadores basados en palabras clave. Para que los usuarios puedan localizar un artículo de su interés, es necesario invertir mucho tiempo y esfuerzo, ya que se requiere un trabajo exhaustivo de análisis de resultados proporcionados por el buscador. Aunado a esto, se tiene que los buscadores son propensos a proporcionar resultados irrelevantes debido a la carencia de estructuras semánticas en los datos que ayuden a mejorar los resultados de las búsquedas.

El enfoque propuesto en este artículo se centra en categorizar resúmenes científicos utilizando mediciones de similitud basadas en conocimiento semántico extraído de WordNet [1]. La idea principal consiste en obtener una similitud semántica entre palabras y luego entre pares de resúmenes que sean las bases del algoritmo de categorización de resúmenes del área de las ciencias computacionales. El objetivo de este enfoque es mejorar la organización de los

---

<sup>1</sup> Google Académico, <https://scholar.google.com.mx/>

<sup>2</sup> DBLP Computer Science Bibliography, <http://dblp.uni-trier.de/>

<sup>3</sup> CiteSeerx, <http://citeseerx.ist.psu.edu/index>

repositorios de resúmenes de tal forma que se faciliten la localización de artículos de interés para el usuario.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se presentan los trabajos relacionados con la categorización de textos y resúmenes de publicaciones científicas. La Sección 3 explica seis mediciones de similitud basadas en conocimiento semántico. El enfoque propuesto en este artículo para la categorización de resúmenes de publicaciones científicas basada en métricas de similitud semántica, se muestra en la Sección 4. La experimentación y resultados de la categorización se exponen en la Sección 5. Finalmente, las conclusiones y el trabajo a futuro son presentados en la Sección 6.

## **2. Trabajos relacionados**

La categorización de textos es un tema de investigación que ha sido ampliamente estudiado desde diversos enfoques estadísticos y semánticos. Sin embargo, la categorización de textos científicos ha sido abordada, en menor medida, utilizando métricas de similitud basadas en conocimiento semántico. Por lo tanto, en esta sección se presenta una revisión de trabajos relacionados, iniciando por el tema general, categorización de textos, y terminando, con la categorización de resúmenes de publicaciones científicas.

Diversos enfoques estadísticos han sido propuestos para la categorización de textos independientes del idioma. En [2] se describe un enfoque para la clasificación de documentos basada en las frecuencias de distribución de las palabras de los textos en las clases, con una técnica no supervisada por lo que no necesita ejemplos previamente etiquetados. Las Máquinas de Soporte Vectorial (MSV) han sido una técnica utilizada para la categorización automática de textos como en [3] y [4], los cuales utilizan las máquinas de soporte vectorial como un clasificador de textos con aprendizaje automático a partir de ejemplos etiquetados para cada clase, los autores argumentan que el uso de MSV logran un desempeño en la categorización de textos igual que métodos robustos. Además, las Máquinas de Soporte Vectorial pueden ser enriquecidas con mediciones de distancias entre los vectores de características textuales, como en [5] que proponen un enfoque

basado en la función de la distancia Euclidiana con MSV tanto para la fase de categorización como de entrenamiento. Finalmente, en esta categoría, se presenta el trabajo de [6], el cual consiste en un enfoque Bayesiano para la categorización automática de textos usando características específicas para cada clase.

También, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han sido utilizadas para la categorización de textos, como en [7] que se presenta un marco de trabajo semi-supervisado con una red neuronal convolutiva para la categorización de textos, mediante la integración de regiones de textos cortos como datos en la etapa de entrenamiento, la cual no necesitará ejemplos etiquetados. En [8] se mejora el enfoque de la red neuronal convolutiva mediante la exploración de nuevas regiones de textos para su integración haciendo uso de del método llamado memoria extensa de términos cortos.

Las mediciones de similitud cuantifican el grado de relación que existe entre dos palabras. Por su parte, estas mediciones consideran información a partir de las redes semánticas. Diversas métricas basadas en conocimiento semántico extraído de *WordNet* han sido utilizadas como es el caso del trabajo presentado en [9], el cual expone seis métricas para calcular el grado de similitud entre dos textos, mediante la combinación de la similitud palabra a palabra dentro de una métrica global para obtener le grado de relación semántica entre dos textos.

Finalmente, la categorización de resúmenes científicos ha sido abordada en los siguientes trabajos. En [10] se utiliza el, ya bien conocido, algoritmo supervisado del k-vecino más cercano aplicando una técnica de punto de transición durante el proceso de selección de términos relevantes, para la categorización de resúmenes. Esta técnica utiliza la frecuencia media de los términos para categorizar un texto debido al hecho de que ella aporta un contenido semántico alto. Un enfoque simple para el agrupamiento de resúmenes científicos es presentado en [11], el cual consiste en agrupar palabras clave y usar mediciones de similitud sintáctica entre documentos y en [12] que presentan una metodología para la construcción de sistemas de clasificación a nivel de instancias de publicaciones científicas en el área de las ciencias de la computación. Los autores

proponen un agrupamiento de las publicaciones dentro de áreas de investigación basado en las relaciones de las cita.

### 3. Mediciones de similitud basadas en conocimiento semántico

Las mediciones de similitud cuantifican el grado de relación que existe entre dos palabras. Por su parte, las mediciones semánticas consideran información a partir de las redes semánticas de las palabras para obtener su grado de relación.

En este artículo hemos recopilado, a partir del estado del arte, un conjunto de mediciones de similitud basadas en conocimiento (redes semánticas de las palabras): *Wu & Palmer*, *Lin*, *Leacock & Chodorow*, *Lesk*, *Resnik* y *Jian & Conrath*. Estas mediciones de similitud semántica utilizan la base de datos *WordNet*, una red semántica de conceptos (palabras), y utilizando las relaciones jerárquicas (es-un) y no jerárquicas con la finalidad de obtener el grado de relación. A continuación se presenta una breve descripción de estas medidas de similitud basadas en conocimiento semántico.

Wu & Palmer [13] presenta una métrica de similitud que considera la profundidad de los dos conceptos dados dentro de la taxonomía de WordNet, y la profundidad del concepto común más específico (*LCS*) entre el par de conceptos ( $c_1, c_2$ ), y combina estos dos valores dentro de una medición de similitud, ecuación 1.

$$Sim_{WuP}(c_1, c_2) = \frac{2 \times \text{profundidad}(LCS)}{\text{profundidad}(c_1) + \text{profundidad}(c_2)} \quad (1)$$

Una medida que llamaremos *Lin*, presentada en [14], retorna el contenido de la información (*IC*) de los dos conceptos de entrada, considerando un factor de normalización. El contenido de la información (*IC*) describe la cantidad de información necesaria para establecer la concordancia entre los dos conceptos de entrada, ecuación 2.

$$Sim_{Lin}(c_1, c_2) = \frac{2 \times IC(LCS)}{IC(c_1) + IC(c_2)} \quad (2)$$

Por su parte, *Leacock & Chodorow* [15] presentan una métrica de similitud semántica que utiliza la longitud (*L*) del camino más corto entre los dos conceptos



usando un conteo de nodos y la profundidad máxima ( $D$ ) de la taxonomía, ecuación 3.

$$Sim_{LCH}(c_1, c_2) = -\log \frac{L}{2^{*D}} \quad (3)$$

La similitud semántica entre dos conceptos de Lesk [16] es definida como la función de traslape entre las definiciones de los conceptos correspondientes, las cuales son extraídas de un diccionario. Esta medición es propuesta como una solución para la desambiguación de sentidos de palabras.

La medida de similitud propuesta por Resnik [17] retorna al concepto común más específico ( $LCS$ ) entre el par de conceptos, añadiendo la probabilidad de encontrar una instancia del concepto común más específico  $P(LCS)$ , ecuación 4.

$$Sim_{RES}(c_1, c_2) = -\log P(LCS) \quad (4)$$

Finalmente, la similitud semántica presentada por Jiang & Conrath [18] que utiliza el contenido de la información ( $IC$ ) del par de conceptos correspondientes y del concepto común más específico ( $LCS$ ) entre ellos, la cual regresa un grado de similitud determinado mediante ecuación 5.

$$Sim_{JIC}(c_1, c_2) = \frac{1}{IC(c_1) + IC(c_2) - 2 \times IC(LCS)} \quad (5)$$

Todas las mediciones anteriores consideran un par de palabras como entrada y generan un valor que indica el grado de relación semántica existente entre ellas.

#### 4. Categorización de resúmenes de publicaciones científicas

En esta sección se presenta el enfoque utilizado para la categorización de publicaciones científicas utilizando la similitud entre resúmenes. El proceso completo de categorización de resúmenes de publicaciones científicas incluye las siguientes etapas: pre-procesamiento de los resúmenes; segmentación de los textos y etiquetado morfológico; cálculo de la similitud entre textos y, finalmente, el agrupamiento de los resúmenes. En la figura 1, se puede observar este proceso.

##### Pre-procesado de los resúmenes

El texto de los resúmenes es segmentado en palabras y un etiquetado de partes de la oración es aplicado mediante *TreeTagger* [19] con el apoyo del

software *GATE- Arquitectura General para la Ingeniería de Textos* [20]. La segmentación en palabras se lleva a cabo utilizando el delimitador espacio en blanco o salto de línea.

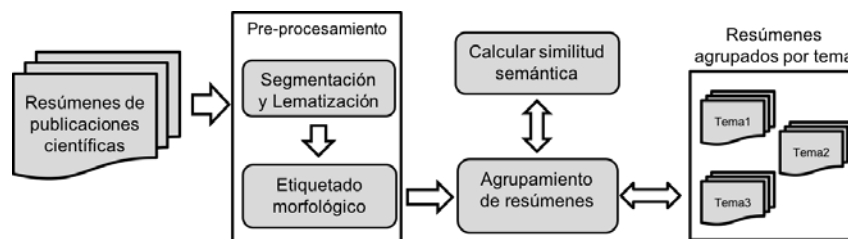


Figura 1 Proceso de categorización de resúmenes.

La lematización consiste en obtener la forma normalizada de cada palabra, es decir, convertir la forma flexionada de una palabra a su forma normal, con las siguientes reglas: singular para sustantivos, masculino y singular para adjetivos e infinitivo para verbos.

Por su parte, el etiquetado de partes de la oración se encarga de asignar una categoría gramatical a cada palabra de una oración. En la figura 2 se muestra un ejemplo de la salida, lema y categoría gramatical, del etiquetador *TreeTagger* para un extracto de texto de un resumen.

**Texto:** *This paper focuses on mining social networks using the information about event logs*  
**Salida:** *This/this/DT paper/paper/NN focuses/focus/VB on/on/IN mining/mine/VB social/social/JJ networks/network/NN using/use/VB the/the/DT information/information/NN about/about/IN event/event/NN logs/log/NN*  
donde: DT = Determinante, NN = Sustantivo, VB = Verbo, IN = Preposición y JJ = Adjetivo.

Figura 2 Texto etiquetado y lematizado con TreeTagger.

La información generada en esta etapa se utiliza para calcular la similitud semántica considerando métricas basadas en el conocimiento semántico, y mediante agrupar las palabras en categorías gramáticas (verbos, sustantivos, adverbios).

### Calcular la similitud semántica entre resúmenes

El cálculo de la similitud semántica entre resúmenes se basa en las métricas de similitud entre palabras. Primero se obtiene una similitud entre pares de palabras

de la misma categoría y, después, una similitud global del resumen. Se utiliza una medida de similitud direccional presentada en [9], la cual indica la similitud semántica de un resumen con respecto al otro. Esta similitud nos proporciona un conocimiento direccional, el cual es combinado entre las dos medidas unidireccionales para obtener una similitud bidireccional.

Para un par de resúmenes de publicaciones dadas, se lleva a cabo un proceso de segmentación, lematización y etiquetado morfológico. Con estas etiquetas se crean conjuntos de palabras normalizadas para verbos, sustantivos y adjetivos. A partir de estos conjuntos se obtiene la similitud, basada en WordNet, entre pares de palabras de la misma categoría. La finalidad de la lematización es poder obtener una similitud alta, aun cuando, las palabras estén en distintas formas flexionadas, además, los conjuntos por categorías evitan comparar semánticamente sustantivos con verbos o sustantivos con adjetivos. Un ejemplo de esta creación de conjuntos por categorías gramaticales para dos extractos de resúmenes se puede observar en la figura 3.

**Resumen 1:** This paper focuses on mining social networks using the information about event logs.

ConjCat<sub>verbo</sub> = {focus, mine, use}

ConjCat<sub>sust</sub> = {paper, network, information, event, log}

ConjCat<sub>adj</sub> = {social}

**Resumen 2:** We study the social networks based on event types.

ConjCat<sub>verbo</sub> = {study, base}

ConjCat<sub>sust</sub> = {network, event, type}

ConjCat<sub>adj</sub> = {social}

Figura 3 Conjunto de categorías para dos resúmenes de artículos científicos.

La similitud entre pares de palabras se realiza de acuerdo a las mediciones de similitud presentadas en la Sección 3. La idea principal es obtener la similitud semántica más alta entre cada par de los conjuntos de palabras. Por lo tanto, se toma la similitud semántica entre dos segmentos presentada en [9] y se adapta para un par de resúmenes  $R_i$  y  $R_j$ , usando la función de similitud de palabra a palabra. Esta adaptación queda en ecuación 6.

$$Sim(R_i, R_j)_{R_i} = \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{w_k \in [ConjCat_i]} maxSim(w_k))}{\sum_{i=1}^n |ConjCat_i|} \quad (6)$$

La ecuación 6 se puede interpretar como sigue:  $w_k$  representa un par de palabras,  $ConjCat_i$  expresa un conjunto de palabras de la misma categoría gramatical (verbo, sustantivo o adjetivo), y  $maxSim(w_k)$  representa la similitud semántica más alta entre un par de palabras de la misma categoría. La tabla 1 muestra la similitud semántica unidireccional, con respecto al resumen 1, utilizando la medida de Wu & Palmer, entre los textos mostrados en la figura 3.

Tabla 1 Similitud unidireccional de Wu & Palmer para un par de resúmenes.

		verbos		sustantivos			adjetivos
		study	base	network	event	type	social
Verbos	focus	0.40	<b>0.41</b>	-	-	-	-
	mine	0.33	<b>0.33</b>	-	-	-	-
	use	0.50	<b>0.50</b>	-	-	-	-
Sustentivos	paper	-	-	0.43	<b>0.46</b>	0.32	-
	network	-	-	<b>1.00</b>	0.55	0.35	-
	information	-	-	0.50	<b>0.55</b>	0.35	-
	event	-	-	0.55	<b>1.00</b>	0.50	-
	log	-	-	<b>0.43</b>	0.40	0.29	-
adjetivos	social	-	-	-	-	-	<b>1.00</b>

Se utilizan los valores de máximas similitudes entre pares de palabras, marcadas en la tabla 1 y, con ellos, se aplica la fórmula (6), para obtener una similitud unidireccional entre el resumen 1 y el resumen 2 de 0.631.

Esta ponderación, la cual se expresa con un valor entre 0 y 1, es el grado de similitud unidireccional basado en el significado de las palabras con respecto a un resumen ( $R_i$ ) de esta manera se obtiene:  $Sim(R_i, R_j)_{R_i}$ . Con la finalidad de obtener

una similitud bidireccional se utiliza una combinación de las similitudes unidireccionales, obtenidas del trabajo presentado en [9], usando una simple función de promedio, esta similitud se expresa mediante ecuación 7.

$$Sim(R_i, R_j) = \frac{sim(R_i, R_j)_{R_i} + sim(R_i, R_j)_{R_j}}{2} \quad (7)$$

El cálculo de la similitud semántica bidireccional entre un par de resúmenes se utiliza para estimar el grado de similitud de cada resumen con respecto al resto, con la finalidad de encontrar sus  $k$ -vecinos más cercanos, y de esta manera determinar la categoría (tópico) de pertenencia.

## Agrupamiento de resúmenes de publicaciones científicas

El agrupamiento de resúmenes de publicaciones científicas fue realizado con el algoritmo de agrupamiento  $k$ -NN ( $k$ -vecinos más cercanos) utilizando el cálculo de similitud semántica entre un par de resúmenes descrito anteriormente. Además de utilizar similitudes de palabra a palabra basadas en *WordNet* y descritas en la Sección 3.

El algoritmo  $k$ -vecinos más cercanos [21] es un método de agrupamiento supervisado, cuya idea es encontrar la categoría de pertenencia de un objeto a partir de los ejemplos (vecinos) más cercanos en función de una similitud en el espacio de características. Este algoritmo necesita un conjunto de ejemplos de entrenamiento, es decir, ejemplos previamente etiquetados con sus categorías, con ellos el algoritmo será capaz de determinar, mediante un valor de  $k$  y la función de similitud, la clase de pertenencia de los ejemplos que se desean categorizar (no etiquetados).

En nuestro caso, los objetos corresponden a los resúmenes de las publicaciones científicas y la función de similitud está determinada por la similitud semántica entre resúmenes. De esta manera, el algoritmo  $k$ -vecinos más cercanos será utilizado para asignar la categoría a un conjunto de resúmenes que se desean clasificar. Este algoritmo necesita un conjunto de resúmenes de entrenamiento, es decir, resúmenes etiquetados con sus tópicos para el número ( $N$ ) de categorías, con ellos el algoritmo, mediante un valor de  $k$  y la función de similitud semántica basada en conocimiento, determina la categoría de pertenencia de nuevos resúmenes.

Para la categorización de resúmenes de publicaciones científicas, el algoritmo  $k$ -vecinos más cercanos queda descrito de la siguiente manera:

- Se tiene como entrada un conjunto de resúmenes clasificados  $D = \{(R_1, C_1), \dots, (R_N, C_N)\}$  y un  $R_x$  a ser clasificado.
- Para cada resumen clasificado  $R_i \in D$ , calcular su grado de similitud semántica con el resumen a clasificar ( $R_x$ ) mediante la fórmula descrita en la ecuación 7, de esta manera se obtiene:  $Sim(R_i, R_x)$ .
- Ordenar las similitudes  $Sim(R_i, R_x)$  de mayor a menor.

- Seleccionar los  $k$  resúmenes más cercanos a  $R_x$ , es decir, cuya similitud sea mayor.
- Asignar al resumen  $R_x$  la etiqueta de la categoría con mayor frecuencia (mayoría de votos) de sus  $k$  resúmenes más cercanos.

## 5. Experimentación y resultados

Con la finalidad de evaluar el enfoque, se llevan a cabo una serie de experimentos, para los cuales utilizamos una colección de resúmenes de publicaciones científicas compiladas y disponibles por la herramienta ArnetMiner [22], las cuales fueron recopiladas a partir de DBLP, ACM y Citeseer. Este conjunto de datos está dividido en 10 categorías. A partir de éste, se extrae un subconjunto de resúmenes con tres categorías: a) Inteligencia Artificial, Ingeniería de Software e Interacción Humano-Computadora. Como resultado, nuestro conjunto está compuesto de 4467 resúmenes y 277 454 palabras (aproximadamente 62 palabras por resumen). Al estar usando un algoritmo supervisado para la categorización, nuestra colección de resúmenes es dividida en 2976 resúmenes para el entrenamiento y 1491 para las pruebas. La distribución de los resúmenes en las tres categorías se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2 Distribución de nuestro conjunto de resúmenes.

Categoría	Número total de resúmenes	Número de resúmenes de entrenamiento	Número de resúmenes de pruebas
Inteligencia Artificial	1826	1217	609
Ingeniería de Software	1463	974	489
Interacción Humano-Computadora	1178	785	393

Los experimentos para evaluar la categorización de resúmenes se llevan a cabo con el algoritmo de  $k$ -vecinos más cercanos, y utilizando un valor de  $k=5$ . Para el cálculo de similitud entre resúmenes, se llevan a cabo experimentos con las 6 mediciones de similitud entre palabras basada en conocimiento semántico, y utilizando las ecuaciones 6 y 7.

La evaluación de todos los experimentos se realizó utilizando las métricas de Precisión (P), Exhaustividad (R) y medida F ampliamente utilizadas en la tarea

categorización y recuperación de información, en nuestro caso, categorización de resúmenes de artículos científicos. Estas métricas comparan los resultados del algoritmo de categorización a ser evaluado con los valores externos de confianza (resúmenes previamente clasificados, proporcionados en la etapa de entrenamiento), utilizando los siguientes valores: a) Verdadero Positivo (VP) es el número de predicciones correctas del algoritmo de categorización de resúmenes que corresponden al juicio externo de confianza (resúmenes preclasificados); Verdadero Negativo (VN) es el número de predicciones correctas del algoritmo de categorización de resúmenes que no corresponden al juicio externo de confianza; Falso Positivo (FP) corresponde al número predicciones incorrectas del algoritmo de categorización de resúmenes que corresponden al juicio externo de confianza; y, finalmente Falso Negativo (FN) es el número de predicciones incorrectas del algoritmo de categorización de resúmenes que no corresponden al juicio externo de confianza.

Bajo estos criterios, se emplea la *Precisión* ( $P$ ) para evaluar los algoritmos en términos de los valores de predicciones positivas, la cual se define en ecuación 8.

$$P = \frac{VP}{VP+FP} \quad (8)$$

También, se utiliza el *Exhaustividad* ( $R$ ) para expresar la tasa de correspondencias correctas con los resúmenes preclasificados de manera externa con una confianza alta, el cual se define en ecuación 9.

$$R = \frac{VP}{VP+FN} \quad (9)$$

Finalmente, la *medida F* que representa la media armónica entre Precisión y Exhaustividad, la cual tiene como fundamento obtener un valor único ponderado entre ellas y se define en ecuación 10.

$$medida F = 2 \times \frac{P \times R}{P+R} \quad (10)$$

Los experimentos se han organizado para medir el impacto de las seis mediciones de similitud basadas en conocimiento semántico para la categorización de resúmenes científicos. Bajo esta consideración, la tabla 3 muestra los resultados, por categoría, de los experimentos para tres mediciones de similitud semánticas (Wu & Palmer, Lin y Leacock & Chodorow) en términos de Precisión y

Exhaustividad, utilizando las ecuaciones 8 y 9 respectivamente. También, se proporciona un peso promedio, resultado de considerar la *medida F*, ecuación 10 y un factor que refleja la importancia (número de resúmenes) de cada categoría.

Tabla 3 Resultados de tres mediciones para la categorización de resúmenes científicos.

Categoría	Wu & Palmer			Lin			Leacock & Chodorow		
	P	R	F	P	R	F	P	R	F
Inteligencia Artificial	0.55	0.70	0.61	0.65	0.80	0.71	0.40	0.70	0.50
Ingeniería de Software	0.70	0.60	0.65	0.85	0.70	0.77	0.36	0.22	0.28
Interacción Humano-Computadora	0.79	0.68	0.73	0.81	0.76	0.78	0.7	0.42	0.53
Peso promedio	0.68	0.66	0.66	0.77	0.75	0.76	0.48	0.45	0.43

Por su parte, la tabla 4 muestra los resultados de los experimentos para tres mediciones de similitud semánticas restantes (Lesk, Resnik y Jiang & Conrath).

Tabla 4 Resultados de tres mediciones para la categorización de resúmenes científicos.

Categoría	Lesk			Resnik			Jiang & Conrath		
	P	R	F	P	R	F	P	R	F
Inteligencia Artificial	0.66	0.74	0.70	0.38	0.4	0.39	0.76	0.94	0.84
Ingeniería de Software	0.79	0.74	0.76	0.4	0.36	0.38	0.93	0.76	0.84
Interacción Humano-Computadora	0.85	0.80	0.83	0.46	0.48	0.47	0.92	0.86	0.88
<b>Peso promedio</b>	<b>0.77</b>	<b>0.76</b>	<b>0.76</b>	<b>0.41</b>	<b>0.41</b>	<b>0.41</b>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	<b>0.86</b>

Los resultados mostrados en las tablas 3 y 4 hacen notar que la medición de similitud semántica de *Jiang & Conrath* como ponderación para la categorización de resúmenes científicos es la mejor alternativa considerando las tres categorías. Con esta métrica se ha logrado un 86 % de resúmenes clasificados correctamente.

Los resultados de nuestra experimentación demuestran la efectividad de nuestro enfoque para la categorización de resúmenes científicos. A pesar de que los resultados son más alentadores para la categoría "Interacción Humano-Computador", el enfoque puede ayudar a los usuarios del ámbito científico a localizar artículos existentes en un repositorio desorganizado de resúmenes, ya



que pueden enfocar su búsqueda en una categoría y no en todo el repositorio. Además, se pueden hacer búsquedas por similitud semántica, proporcionando un resumen como ejemplo.

## 6. Conclusiones

Este artículo ha presentado un enfoque para la categorización de resúmenes de artículos científicos del área de las ciencias computacionales, considerando las siguientes categorías: artículos científicos sobre Interacción Humano-Computadora, Ingeniería de Software e Inteligencia Artificial. Este enfoque utiliza mediciones de similitud, primero entre palabras y después entre resúmenes, basadas en conocimiento semántico extraído de la base de datos *WordNet*. Estas métricas obtienen una similitud entre palabras, luego con ellas se calcula una similitud global entre un par de resúmenes separando las clases gramaticales (verbos, sustantivos y adjetivos). La similitud global es utilizada, por el algoritmo de categorización, para encontrar los k-vecinos más cercanos de cada resumen con la finalidad de asignar la categoría de pertenencia.

Como una evaluación de nuestro enfoque, se han presentado una serie de experimentos con seis mediciones de similitud semántica. Los experimentos han mostrado resultados prometedores para la categorización de resúmenes científicos, demostrado que la métrica de *Jiang & Conrath* resulta ser la mejor alternativa como medida de ponderación de similitud entre palabras, la cual se utiliza como base del algoritmo de categorización que presenta un desempeño promedio de 86% de resúmenes categorizados correctamente para los tres tipos de textos.

La categorización presentada en este artículo puede ayudar a los usuarios a localizar un artículo científico de manera más rápida, ya que no tendrán que buscar en todo un repositorio, por el contrario se enfocarían en una categoría específica. Como trabajo futuro, se pretende desarrollar un sistema de búsqueda de artículos científicos basada en la categorización de resúmenes o bien, proporcionando un resumen de ejemplo.

## 7. Bibliografía y Referencias

- [1] G. A. Miller, "WordNet: a lexical database for English". *Communications of the ACM*. Vol. 38. No. 11. 1995. Pp. 39-41.
- [2] L. D. Baker, A. K. McCallum, "Distributional clustering of words for text classification". *Proceedings of the 21st annual international ACM SIGIR conference on Research and development in information retrieval*. 1998. Pp. 96-103.
- [3] T. Joachims, "Text categorization with support vector machines: Learning with many relevant features". *European conference on machine learning*. Springer Berlin Heidelberg. 1998. Pp. 137-142.
- [4] F. Sebastiani, "Machine learning in automated text categorization". *ACM computing surveys*. Vol. 34. No. 1. 2002. Pp. 1-47.
- [5] L. H. Lee, C. H. Wan, R. Rajkumar, D. Isa, "An enhanced support vector machine classification framework by using Euclidean distance function for text document categorization". *Applied Intelligence*. Vol. 37. No. 1. 2012. Pp. 80-99.
- [6] B. Tang, H. He, P. M. Baggenstoss, S. Kay, "A Bayesian classification approach using class-specific features for text categorization". *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. Vol. 28. No. 6, 2016. Pp. 1602-1606.
- [7] R. Johnson, T. Zhang, "Semi-supervised convolutional neural networks for text categorization via region embedding". *Advances in neural information processing systems*. 2015. Pp. 919-927.
- [8] R. Johnson, T. Zhang, "Supervised and Semi-Supervised Text Categorization using LSTM for Region Embeddings". *Proceedings of The 33rd International Conference on Machine Learning*. 2016. Pp. 526-534.
- [9] C. Corley, R. Mihalcea, "Measuring the Semantic Similarity of Texts". *Proceedings of the ACL Workshop on Empirical Modeling of Semantic Equivalence and Entailment*. 2005. Pp. 1318.
- [10] D. Pinto, H. Jiménez-Salazar, P. Rosso, "Clustering abstracts of scientific texts using the transition point technique". *International Conference on*

- Intelligent Text Processing and Computational Linguistics. Springer. 2006. Pp. 536-546.
- [11] M. Alexandrov, A. Gelbukh, P. Rosso, "An approach to clustering abstracts". International Conference on Application of Natural Language to Information Systems. Springer. 2005. Pp. 275-285.
- [12] L. Waltman, N. J. Eck, "A new methodology for constructing a publication-level classification system of science". Journal of the American Society for Information Science and Technology. Vol. 63. No. 12. 2012. Pp. 2378-2392.
- [13] Z. Wu, M. Palmer, "Verbs semantics and lexical selection". Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics. 1994. Pp. 133-138.
- [14] D. Lin, "An information-theoretic definition of similarity." ICML. Vol. 98. 1998. Pp. 296- 304.
- [15] C. Leacock, M. Chodorow, "Combining local context and WordNet similarity for word sense identification". WordNet: An electronic lexical database. Vol 49. No. 2. 1998. Pp. 265-283.
- [16] S. Banerjee, T. Pedersen, "An adapted Lesk algorithm for word sense disambiguation using WordNet". Computational linguistics and intelligent text processing. Springer Berlin Heidelberg. 2002. Pp. 136-145.
- [17] P. Resnik, "Using information content to evaluate semantic similarity". Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Montreal, Canada. 1995.
- [18] J. Jiang and D. Conrath, "Semantic similarity based on corpus statistics and lexical taxonomy". Proceedings of the International Conference on Research in Computational Linguistics. Taiwan. 1997.
- [19] S. Helmut "Improvements in Part-of-Speech Tagging with an Application to German". Proceedings of the ACL SIGDAT-Workshop, Dublin. 1995. Pp. 47-50.
- [20] H. Cunningham, "GATE, a general architecture for text engineering". Computers and the Humanities. Vol. 36. No. 2. 2002. Pp. 223-254.

- [21] D. W. Aha, D. Kibler, M. K. Albert, "Instance-based learning algorithms". *Machine learning*. Vol. 6. No. 1. 1991. Pp. 37-66.
- [22] J. Tang, J. Zhang, L. Yao, J. Li, L. Zhang, Z. Su, "Arnetminer: extraction and mining of academic social networks". *Proceedings of the 14th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. ACM. 2008. Pp. 990-998.

## **8. Autores**

El Dr. José Alejandro Reyes Ortiz obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación en el 2013 por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Desde julio de 2013 se encuentra trabajando como Profesor Investigador en el Departamento de Sistemas de la UAM Azcapotzalco, pertenece al Área de Investigación en Sistemas de Información Inteligentes. Sus principales áreas de interés son: procesamiento de lenguaje natural, diseño y desarrollo de ontologías; aprendizaje de ontologías a partir de textos y diseño e implementación de aplicaciones de cómputo móvil.

La Dra. Maricela Claudia Bravo Contreras obtuvo el grado de doctor en Ciencias de la Computación en el 2006 por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Desde mayo de 2011 se encuentra trabajando como Profesora Investigadora en el Departamento de Sistemas de la UAM Azcapotzalco, pertenece al Área de Investigación en Sistemas de Información Inteligentes. Sus principales áreas de interés son: composición automatizada y optimización de servicios Web públicos, diseño y desarrollo de ontologías; diseño e implementación de aplicaciones de cómputo móvil, cómputo ubicuo y sistemas sensibles al contexto.

# HACIA APLICACIONES COLABORATIVAS ADAPTABLES AL BLENDED-LEARNING

***Dora Angélica Ávila Galván***

Universidad Veracruzana  
*zs14016151@estudiantes.uv.mx*

***María del Carmen Mezura Godoy***

Universidad Veracruzana  
*cmezura@uv.mx*

***Gabriela Sánchez Morales***

Universidad Veracruzana, CONACYT  
*gsanchezmo@conacyt.mx*

## **Resumen**

El blended-learning es un tipo de aprendizaje mixto en el que se combina la modalidad presencial con la virtual y dadas las características que posee, éste desarrolla habilidades de colaboración. Muchas de las aplicaciones usadas en el blended-learning son colaborativas ya que habilitan la interacción entre los participantes de una clase y algunas permiten llevar a cabo las actividades, ya sea de manera grupal o individual, e incluso ofrecen el material involucrado. Sin embargo, la mayoría de estas aplicaciones colaborativas, no estiman adaptarse al contexto en el que se desenvuelve el usuario; por ejemplo, adaptarse al trabajo en equipo dentro del salón de clase, así como tampoco brindan una adaptación hacia el usuario considerando el rol que puede desempeñar. En consecuencia, en este artículo se propone la creación de aplicaciones colaborativas adaptadas al blended-learning mediante el modelo MACAB que considera el trabajo individual y grupal, dentro y fuera del salón de clase, dando los elementos necesarios para adaptarse al usuario y a su entorno. Además de proporcionar los elementos del

modelo, se describen las relaciones entre ellos y se presentan un escenario y un prototipo para ejemplificar el modelo.

**Palabra(s) Clave(s):** adaptación al entorno, aplicaciones colaborativas, blended-learning, modelo.

## **1. Introducción**

Blended-learning (b-learning) es un tipo de aprendizaje mixto en el que se combinan dos modelos de enseñanza y aprendizaje: los sistemas de aprendizaje tradicionales cara a cara y los sistemas de aprendizaje distribuidos [1]. Otro punto de vista considera que b-learning busca integrar de manera reflexiva las experiencias del aprendizaje cara a cara (síncrona), con las experiencias de aprendizaje en línea (asíncrona) [2]. Blended-learning mezcla diversas actividades basadas en eventos, como la docencia presencial en las aulas, herramientas e-learning y aprendizaje a ritmo propio. A pesar de que no existe una fórmula que garantiza el aprendizaje de los estudiantes, el b-learning se basa en la búsqueda de calidad y cantidad de la interacción, y el sentido de la participación en una comunidad de investigación y aprendizaje, logrado a través de la integración efectiva de la tecnología de Internet para utilizar materiales existentes, así como facilitar una experiencia de aprendizaje autónoma y colaborativa [2]. Algunos de los requisitos del b-learning son:

- Sesiones del programa formativo tanto en línea (vía Internet) como presenciales.
- Responsabilidad individual (todos los miembros son responsables de su desempeño individual dentro del grupo).
- Interdependencia positiva (los miembros del grupo dependen los unos de los otros para lograr la meta común).
- Habilidades de colaboración (por ejemplo, trabajo en equipo, liderazgo y solución de conflictos).
- Interacción promotora (interacción entre los miembros del grupo para desarrollar relaciones interpersonales y establecer estrategias efectivas de aprendizaje).

- Un proceso de grupo en el que reflexionen en forma periódica y evalúen su funcionamiento, efectuando los cambios necesarios para incrementar su efectividad (autoevaluación y coevaluación) [3].

Frecuentemente, las Aplicaciones Colaborativas (AC) son usadas en el b-learning para trabajar de manera grupal debido a su naturaleza, pues se definen como sistemas basados en redes de computadoras, que proveen el soporte necesario para que los grupos de personas puedan realizar tareas colaborativamente, proporcionando una interfaz a un entorno compartido [4]. Estas aplicaciones dan soporte al b-learning debido a las siguientes características: proveer un ambiente de colaboración, mantener la información en un sitio en común e interactuar con otros usuarios. Además, estas AC cumplen tres funciones: comunicación, coordinación y colaboración, no importando en donde se encuentren ubicados los colaboradores, ya sea que se encuentren al mismo tiempo en el mismo lugar (interacción cara a cara), mismo tiempo en diferente lugar (interacción síncrona distribuida), mismo lugar en diferente tiempo (interacción asíncrona) y diferente lugar en diferente tiempo (interacción asíncrona distribuida) [5].

Algunos ejemplos de AC que pueden ser utilizadas en el b-learning son: Skype, software de video llamadas que permite crear chats grupales, compartir la pantalla, enviar fotos y archivos de cualquier tamaño [6]; Google Docs, que sirve para crear documentos de diversos formatos en línea con la posibilidad de compartirlos y de añadir colaboradores cuando el usuario lo requiera [7]; PreZentit, aplicación office en línea que permite trabajar en equipo presentaciones al mismo tiempo, además ofrece la opción de decidir si la presentación es privada o pública [8]; y LMS (*Learning Management System*), software que organiza y facilita el acceso a los servicios de aprendizaje en línea para estudiantes y profesores, así mismo, proporciona interacción entre los miembros del curso y brinda los recursos electrónicos de contenidos de aprendizaje y de herramientas de comunicación, entre otros [9], algunos ejemplos de este tipo de plataformas son Moodle [10], Blackboard Learn [11], Eminus [12], Chamilo lms [13] y Sakai [14].

Para contextualizar el uso de las aplicaciones anteriores, se usará Google Docs en un escenario para ver cómo funciona actualmente. Supongamos que Andrés,

Liliana, Luis y Mario, estudiantes, y Carlos, profesor, siguen un modelo de aprendizaje por competencias. Carlos pide realizar una presentación en parejas acerca de la herencia de objetos en programación, tema que está por comenzar. Los estudiantes se organizan en parejas y cada uno ingresa a Google Docs usando su correo de Gmail en la URL correspondiente. Los estudiantes crean su documento y lo comparten a su compañero de equipo, incluyendo al maestro. Las parejas de alumnos establecen que ellos pueden editar, mientras que el profesor solo puede ver; posteriormente, cada equipo abre el chat ya que está disponible. Es importante mencionar que Andrés no se presentó a clases, pero Liliana, su compañera de equipo, lo invita mediante la aplicación. Ambos equipos terminan y le informan al profesor que han terminado, unos mediante el chat y otros de manera verbal; posteriormente el profesor evalúa la presentación dejando un comentario sobre ésta.

El ejemplo anterior tiene varias funcionalidades que ayudan al trabajo en equipo, por ejemplo:

- Invitar a los participantes.
- Indicar quiénes forman el grupo de trabajo.
- Proporcionar un chat para que se comuniquen.
- Proveer la opción de establecer quiénes editan, ven y comentan sobre el documento.
- Poner el cursor para indicar en qué parte del trabajo se encuentra el usuario.
- Brindar cierto grado de adaptación de la Interfaz de Usuario (IU) al habilitar o deshabilitar funciones acuerdo a los privilegios otorgados al compartir el documento; de hecho, a pesar de que no proporciona una forma de evaluación como tal, los usuarios pueden realizar cualquier tipo de comentarios.

No obstante, existen ciertos aspectos que se deben cubrir al realizar una actividad colaborativa. Por ejemplo, al compartir un documento, el usuario pierde su espacio de trabajo privado, aun cuando sólo les brinde la opción de ver o comentar; los



otros usuarios podrán observar sus acciones dentro de la actividad independientemente de que siga realizándola de forma individual, a menos que decida compartir el documento una vez finalizado y no antes. De igual forma, a pesar de que las aplicaciones actuales brindan cierto tipo de configuración; no les proporciona a los usuarios la alternativa de realizar una configuración más personalizada, como elegir sobre qué secciones del documento se puede editar o comentar. Trasladando la configuración en un entorno educativo, se podría permitir a un docente o a los estudiantes configurar normas para asignar sub-actividades dentro de los grupos de trabajo, ya que actualmente algunos LMS permiten asignar actividades. Actualmente, son pocas las aplicaciones que habilitan o deshabilitan funciones de acuerdo a los privilegios del usuario; sin embargo, lo ideal sería mostrarlas u ocultarlas según sea conveniente, ya que es irrelevante que los usuarios puedan verlas si no tienen acceso a ellas. También, sería importante considerar si el alumno está dentro o fuera del salón de clase; en el caso de una clase presencial, se debería proveer en un pizarrón electrónico el área colaborativa de todos los alumnos, y en los dispositivos personales poder ver sólo las actividades realizadas por su equipo correspondiente.

Las AC anteriores que consideran el lugar y la actividad grupal o individual han sido estudiadas en el área de plasticidad de los sistemas interactivos. La plasticidad es definida como la capacidad de los sistemas para adaptarse a un conjunto de contextos de uso, garantizando en todo momento un conjunto de criterios de calidad, de usabilidad y de continuidad de interacción [15]. El contexto de uso puede clasificarse en tres dimensiones que corresponden:

- Al usuario.
- La plataforma
- El entorno.

El usuario se refiere a la persona que utilizará el sistema; la plataforma considera los dispositivos de hardware y software que se encuentran disponibles para llevar a cabo la interacción del usuario con el sistema y finalmente el entorno se refiere a las condiciones físicas y sociales donde ocurre la interacción [16].

Por un lado, existen AC que son usadas en el ambiente educativo aun cuando no fueron desarrollados para este medio, por ejemplo, Google Docs; por otro lado, las AC que apoyan las actividades escolares se enfocan en administrar los contenidos, proveer material y, ocasionalmente, determinar si las actividades serán grupales o individuales, como es el caso de Moodle. Incluso, cuando las AC apoyan al desarrollo de actividades escolares, estas pueden verse enriquecidas al considerar más elementos que requiere el b-learning, por ejemplo: tener en cuenta la ubicación física de los alumnos debido a que la interacción puede ser cara a cara o a distancia, o estimar el rol de los estudiantes en las actividades. Por tal motivo, se considera de interés construir aplicaciones colaborativas adaptables al ambiente educativo, en específico al b-learning. Para lograr que estas aplicaciones cubran ciertas características, es recomendable basarse en modelos; en consecuencia, en este trabajo se presenta un modelo basado en el contexto de uso, considerando este tipo de aprendizaje para crear aplicaciones colaborativas en apoyo a las actividades dentro o fuera del salón de clase.

Este artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera; en la sección dos, se presenta el modelo MACAB que comprende los elementos del contexto de uso y del blended-learning; en la sección tres, se describe un escenario que ejemplifica una AC adaptable al b-learning. En la sección cuatro, se muestra un prototipo que es el resultado de llevar a cabo el modelo MACAB, dicho prototipo consiste en una aplicación colaborativa de lluvia de ideas adaptable al entorno b-learning. En la sección cinco, se exponen algunos modelos tomados como base en esta investigación y se realiza una comparativa con el modelo propuesto; por último, en la sección seis, se incluyen las conclusiones y el trabajo a realizar en un futuro.

## **2. MACAB: Modelo para Aplicaciones Colaborativas Adaptables al Blended-learning**

El modelo MACAB es una evolución del modelo [17], el cual combina las características del blended-learning con las aplicaciones colaborativas y la plasticidad de los sistemas interactivos. Los elementos considerados en el modelo

MACAB son clasificados en dos partes, con la finalidad de expresar cuáles corresponden al contexto y cuáles al b-learning.

Los elementos correspondientes al contexto de uso son:

- **Usuario.** Este elemento se refiere a la persona que utiliza la aplicación colaborativa para un propósito específico; por ejemplo, puede ser para realizar una actividad.
- **Entorno.** Considera dos tipos de entorno: (1) el entorno físico que contempla la ubicación del alumno; por ejemplo, el salón de clases y (2) el entorno social, que considera si el alumno realiza la actividad solo o en equipo en dicho salón.
- **Plataforma.** Este elemento comprende los dispositivos empleados por el usuario para utilizar la aplicación colaborativa. Cada dispositivo cuenta con hardware y software. En el hardware se consideran los atributos físicos como sensores, batería, tamaño del disco duro y de la pantalla, por mencionar algunos; y en la parte de software se consideran dos tipos: (1) el software de propósito general, por ejemplo, herramientas tales como el correo electrónico, videos, foros, que permitan transmitir la clase o grabarla, entre otras y (2), el software colaborativo de edición; al cual se recomienda incluir las áreas de trabajo pública (espacio en el que los usuarios trabajan y realizan sus aportes colaborativamente) y privado (espacio donde el usuario trabaja de manera individual sin que otros usuarios tengan algún tipo de acceso), así como la conciencia de grupo también conocida como *awareness*, que se define como la comprensión de las actividades de los otros miembros del grupo, las cuales proveen un contexto para nuestra propia actividad [18].

Así mismo los elementos pertenecientes al b-learning son:

- **Rol.** Es el papel que desempeña el usuario, en este caso pueden considerarse los roles de docente, instructor o facilitador, coordinador de actividad, estudiante.

- **Modelo de enseñanza.** Se refiere al plan estructurado contemplado para diseñar materiales de enseñanza. En este caso, se consideran tres enfoques principales [19]:
  - ✓ Habilidades, cuyo objetivo es que el alumno desarrolle habilidades y conocimientos específicos.
  - ✓ Actitudes que busca desarrollar conductas específicas entre los alumnos.
  - ✓ Competencias que se refiere a la transmisión de conocimientos a través de clases presenciales y tutorías o complementos de clase de forma virtual.
- **Unidad de aprendizaje.** Puede incluir desde un tema hasta un módulo de aprendizaje completo a estudiar durante un periodo de tiempo. Por ejemplo, un tema específico de un temario o un curso.
- **Actividad.** Se refiere a la tarea indicada por el docente o instructor para ser realizada o manipulada por el alumno, ya sea de forma grupal o individual. Cada actividad tendrá sus propias características: tipo, desarrollo individual o por equipo, fecha de entrega, entre otras. Por ejemplo, resúmenes, diagramas, dibujos, presentaciones, por mencionar algunas actividades.
- **Evaluación.** Se refiere a la forma en la que será evaluada la unidad de aprendizaje mediante la(s) actividad(es) establecida por el docente.
- **Objeto.** Este elemento puede ser un objeto de aprendizaje (OA), o bien puede tratarse de algún otro material de apoyo como presentaciones, artículos, libros, videos, etc., que utilice el docente para impartir su clase.
- **Método de impartición.** Al hablar de b-learning, se considera una modalidad semipresencial, es decir, existe una combinación de clases presenciales y virtuales, estas últimas apoyadas por tecnología como videoconferencias, correo electrónico, foros, chats, entre otros, y que el docente determina cuándo y cómo llevarlas a cabo. Sin embargo, en esta propuesta se incluye la modalidad Mixta, en ella se contempla la posibilidad de que no todos los alumnos se encuentren en el salón de clase y que, aun así, puedan obtener la clase y participar en las actividades.

- **Trabajo individual.** Se refiere a que la actividad es realizada de manera individual por el alumno (a) usando un dispositivo de cómputo, esta actividad es efectuada en un área o espacio de trabajo privado.
- **Trabajo grupal.** Se refiere a que la actividad es realizada en equipo usando uno o varios dispositivos de cómputo homogéneos o heterogéneos. El trabajo grupal puede ser realizado en un área de trabajo pública. Cabe destacar que hay diferentes tamaños de grupos, desde una sola persona hasta redes que involucran a gran cantidad de colaboradores.

Cada elemento dentro del modelo, está relacionado con uno o varios elementos de una u otra forma (figura 1).

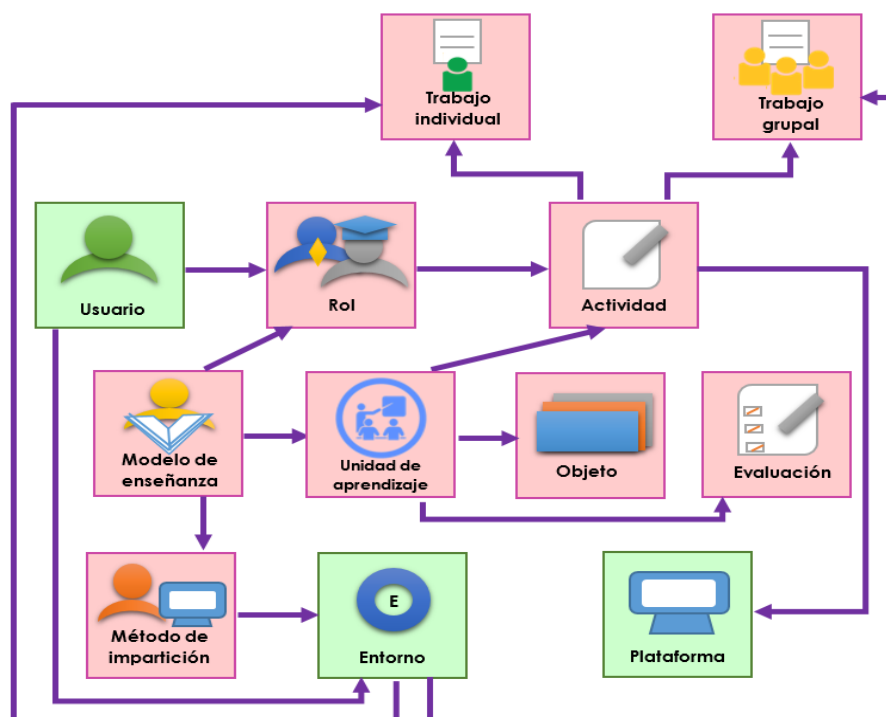


Figura 1 Modelo MACAB.

El **usuario** está relacionado con el **rol** y el **entorno**, su relación con el **rol** es para denotar que puede desempeñar uno o varios roles; por ejemplo, los alumnos desempeñan el rol de estudiante, sin embargo, cuando trabajan grupalmente, uno de ellos también desempeñaría el rol de coordinador de la actividad dentro del

equipo. A su vez, la relación del **usuario** con el **entorno** denota que los alumnos pueden encontrarse dentro o fuera del salón de clase, así como, las reglas y condiciones sociales proporcionadas por la conciencia de grupo al trabajar en equipo.

El **rol** se encuentra asociado con la **actividad**, pues de acuerdo a este elemento, la **actividad** podrá ser definida o realizada. Por ejemplo, el docente puede decidir el tipo y las características de la tarea que deberán realizar o manipular los estudiantes.

La **actividad** se relaciona con el **trabajo individual**, el **trabajo grupal** y la **plataforma**. Su relación con el **trabajo individual** y el **trabajo grupal** consiste precisamente, en sí dicha actividad deberá realizarse de manera individual o por equipo. En cuanto a la relación entre la **actividad** y la **plataforma**, significa que estas actividades podrán ser realizadas o manipuladas a través de cierto software de diversos dispositivos como PC, Tablet, Smartphone, entre otros.

El **modelo de enseñanza** se vincula con el **rol**, la **unidad de aprendizaje** y el **método de impartición**. La relación entre el **modelo de enseñanza** con el **rol** radica en que este último dependerá del modelo adoptado por el profesor. De igual forma, el vínculo entre el **modelo de enseñanza** y la **unidad de aprendizaje**, se debe a que dicho modelo definirá la forma en la que esta unidad será impartida a los alumnos. Así mismo, la **unidad de aprendizaje** se relaciona con el **objeto**, pues de acuerdo a ésta serán los materiales a utilizarse en la clase; además, dicha unidad debe tener una **evaluación**, la cual puede realizarse a través de las **actividades** que deberán realizar los alumnos contempladas en la unidad, generando una relación entre estos elementos.

En el caso de la relación entre el **modelo de enseñanza** y el **método de impartición**, surge porque de acuerdo al modelo de enseñanza adoptado, puede sugerirse si la clase será tomada de manera presencial o virtual, afectando al **método de impartición** el cual, a su vez, impacta en el **entorno**, pues los alumnos podrán encontrarse dentro o fuera del salón de clase. De igual forma, el **entorno** se relaciona con el **trabajo grupal**, pues la parte social del entorno considera las reglas y condiciones en las que debe realizarse el **trabajo grupal**.

La información obtenida mediante cada uno de los elementos del modelo MACAB y sus relaciones debe ser analizada por un componente de adaptación, que incluya un módulo de razonamiento con reglas o agentes de software que la procesen y evalúen para llevar a cabo la adaptación de la IU. Por ejemplo, una aplicación colaborativa de edición podría adaptar su IU, a través de un componente de adaptación, para mostrar u ocultar módulos de acuerdo a varios elementos, por ejemplo: al rol, la unidad de aprendizaje y la actividad a llevar a cabo por el usuario, por mencionar algunos.

### **3. Escenario de uso de MACAB**

El modelo MACAB podrá ser utilizado en diferentes escenarios; en este caso se muestra mediante un LMS y una aplicación colaborativa, resaltando entre paréntesis los elementos del modelo.

**Escenario:** Imaginemos en un salón de clases (**Entorno**) al profesor Carlos (**Usuario**) que está por impartir el módulo de aprendizaje del reino animal de la clase de Biología (**Unidad de aprendizaje 3**). Él ingresa al LMS (**Plataforma software**) y el sistema detecta que tiene el rol de instructor (**Rol**) puesto que sigue un enfoque por competencias (**Modelo de enseñanza**). Los alumnos Luis, Mario, Liliana y Andrés (**Usuario**) quiénes son estudiantes (**Rol**), también ingresan al LMS ya que siempre usan ese sistema.

Andrés no pudo ir al salón porque está enfermo, pero él asiste a clase de manera virtual usando la opción de video llamada (**Plataforma software**) contenida en el LMS, la cual fue habilitado por el instructor al seleccionar clases mixtas (**Método de impartición**). Carlos, el instructor, solicita una lluvia de ideas del reino animal (**Actividad 2**) en parejas (**Trabajo Grupal**), que deben basarla en una presentación (**Objeto 1**) previamente proporcionada.

Todos los alumnos ingresan a la Aplicación Colaborativa Lluvia de Ideas (**Plataforma software**) desde sus Tablets (**Plataforma hardware**) para realizar la actividad solicitada. Por un lado, Luis y Mario se sientan alrededor de la mesa 1 y pasan su Tablet sobre un sensor (**Plataforma hardware**) que sirve para registrar los miembros del equipo en el LMS. El LMS los registra como equipo 1 debido al

número de la mesa. Por otro lado, Liliana se ubica en la mesa 2 y pasa su Tablet sobre el sensor ubicado sobre la mesa. En el caso de Andrés, él indica en el sistema que pertenece al equipo 2.

De acuerdo a las reglas establecidas en el módulo de razonamiento, el componente de adaptación, debe procesar el hecho de que un alumno no puede asistir a clase de manera presencial (**Método de impartición**) y adecuar la aplicación para que ésta provea la información necesaria para que Andrés pueda trabajar en equipo de manera remota; por ejemplo, informar qué parte de la actividad están haciendo los miembros de su equipo (**Trabajo grupal**). Además, debe habilitar el chat para que Liliana pueda entablar una conversación con Andrés. En el caso de Luis y Mario, el componente de adaptación debe deshabilitar y no mostrar el chat ya que los integrantes se encuentran dentro del salón de clase comunicándose cara a cara, a menos de que ellos quieran activarlo. De igual forma, se muestran u ocultan más componentes o funciones de acuerdo a las reglas de trabajo establecidas por el docente o por el mismo equipo de estudiantes.

#### **4. Aplicación lluvia de ideas aplicando el modelo MACAB**

Como resultado de la investigación, se desarrolló un prototipo basado en el modelo MACAB; dicho prototipo consiste en una aplicación colaborativa de lluvia de ideas adaptable al usuario y al entorno, el cual funciona como en el escenario anterior, excepto por el módulo del sensor.

El prototipo sigue el Diseño Centrado en el Usuario que contiene 3 etapas: 1) análisis de requerimientos, 2) diseño e 3) implementación [20]. Para la etapa de análisis de requerimientos se realizó una prueba con usuarios en la que se obtuvieron los requerimientos funcionales y no funcionales de la aplicación. En los requerimientos funcionales se incluye: determinar la forma de trabajar del usuario (grupal o individual), adaptar la IU de acuerdo a la forma de trabajo elegido y a la plataforma; si se trabaja de forma colaborativa, la aplicación debe mostrar qué usuarios se encuentran trabajando en el momento, así como proporcionar un medio de comunicación (chat) y mostrar u ocultar componentes de acuerdo al rol



del usuario, entre otros. Dentro de los requerimientos no funcionales, los usuarios consideraron de interés incluir más colores y mejorar la apariencia de la interfaz. En la etapa de diseño, se tomó como base el modelo MACAB y posteriormente, se determinó la arquitectura de la aplicación (figura 2); así mismo, se esbozó la base de datos, las interfaces de usuario y la adaptación de la interfaz por medio reglas contenidas en un módulo de razonamiento ubicado dentro de un componente de adaptación. Este componente recibe la información correspondiente del modelo, almacenada en una base de datos. Finalmente, se realizó la implementación del prototipo de la aplicación para la cual se utilizó HTML5, CSS y JavaScript.

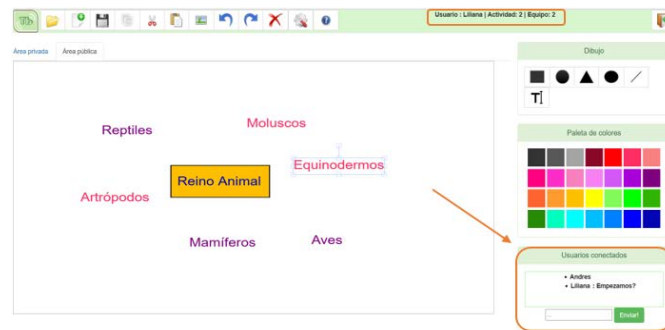


Figura 2 Arquitectura de la aplicación de lluvia de ideas.

Retomando el escenario anterior, la interfaz de la aplicación se adapta de acuerdo a si los usuarios están cara a cara o en diferentes lugares (distribuidos), habilitando un chat cuando los miembros de un equipo están distribuidos como en el caso de Liliana y Andrés; o deshabilitándolo cuando se encuentran en el mismo lugar como en el caso de Luis y Mario (figura 3). Así mismo, la interfaz muestra u oculta componentes de acuerdo al rol del usuario; por ejemplo, el docente únicamente puede evaluar y realizar comentarios sobre el diagrama, pero no puede modificar la actividad realizada por los alumnos. Además, se les provee a los usuarios la posibilidad de que determinen normas sobre su trabajo colaborativo, es decir, al realizar un diagrama de forma colaborativa, el docente puede definir si todos los miembros de un equipo podrán disponer de todas las herramientas o en cambio, asignar una de ellas o una función específica a cada miembro. A su vez, estas normas de trabajo también pueden ser configuradas por los integrantes del equipo.



a) Ejemplo de trabajo en grupo con usuarios trabajando cara a cara.



b) Ejemplo de trabajo en grupo con usuarios distribuidos

Figura 3 Aplicación colaborativa de lluvia de ideas.

## 5. Discusión

Desde hace algunos años, se busca que la utilización de los sistemas y aplicaciones sea de lo más fácil e intuitiva posible para los usuarios, por ello, se han realizado diversos trabajos entre los que destacan modelos que consideran la adaptación de los sistemas al contexto de uso, el cual incluye el usuario, la plataforma y el entorno. Es importante mencionar la existencia de varios modelos que consideran al usuario, al estimar algunas de las siguientes características: actividad, perfil, experiencia, rol, hábitos personales y estado emocional [21] y [22]. En este trabajo se considera tanto el rol como la actividad para hacer la adaptación de la IU.

En el caso de la dimensión plataforma, existen modelos que consideran los controles de pantalla (ej., brillo), el ancho de banda, la conectividad y los recursos [21], o de manera general [22]. En esta investigación se consideran sensores externos, tamaño del disco duro, software de propósito general (correo electrónico, video, etc.) y software colaborativo.

El último elemento del contexto de uso corresponde al entorno, en el cual existen modelos que consideran algunas de las siguientes características: ubicación (ej., posición relativa), interacción social, condiciones físicas (iluminación, etc.), infraestructura del entorno y actividad grupal [21] y [22]. En el caso de MACAB se considera la ubicación y la forma en que se realiza la actividad, es decir, individual o grupal.

Además de los modelos anteriores, existen diversas investigaciones orientadas en las interfaces de usuario adaptables como lo son [23] y [24], que se enfocan en la adaptación considerando el dispositivo. En este tema de investigación, para realizar la adaptación de la IU se considera el usuario, el entorno y el dispositivo.

Así mismo, existen modelos que identifican algunos de los siguientes elementos necesarios del b-learning, por ejemplo: método de impartición, distribución del contenido, construcción individual y cooperativa, modelo de enseñanza, comunicación entre los estudiantes y el docente, ambiente síncrono o asíncrono y la tecnología [25], [26] y [27]. En este trabajo se consideran las siguientes características de b-learning, como son la unidad de aprendizaje y su evaluación, el objeto a estudiar, el trabajo individual y grupal, el modelo de enseñanza y el método de impartición. Es importante mencionar, que en este trabajo se consideró tanto el rol como la actividad como parte del b-learning ya que estas tienen una estrecha relación con este tipo de aprendizaje.

Sin embargo, aun cuando estos modelos consideran la adaptación a uno o varios componentes del contexto de uso, ninguno está enfocado a crear aplicaciones colaborativas que se enfoquen al contexto b-learning, así como a incluir áreas o espacios de trabajo privado y público para permitir al usuario trabajar de forma individual o grupal, motivo por el que se consideró la necesidad de crear un modelo que contemple estos aspectos anteriores.

## **6. Conclusiones**

En este artículo se propone el modelo MACAB enfocado a proporcionar adaptación de la interfaz de acuerdo al contexto de uso que incluye tres elementos: usuario, plataforma y entorno; así como al blended-learning.

A su vez, el modelo aborda la inclusión del trabajo individual y grupal, así como una nueva modalidad para considerar dentro del b-learning, la mixta, en la que se considera que el estudiante pueda tomar la clase y ser parte del trabajo en equipo sin tener que estar dentro del salón de clase, es decir, el alumno puede estar virtualmente presente.

Así mismo, se describe brevemente el desarrollo del prototipo de la aplicación colaborativa de lluvia de ideas adaptable al b-learning. Como trabajo futuro, se realizará la evaluación de este prototipo y se buscarán mejoras para el modelo propuesto con el fin de que posteriormente se presente una arquitectura para aplicaciones colaborativas adaptables al b-learning.

**Agradecimientos.** Queremos agradecer a CONACYT por la beca con número 338813 y el proyecto de Cátedras CONACYT denominado "Infraestructura para Agilizar el Desarrollo de Sistemas Centrados en el Usuario" (Ref. 3053). También queremos agradecer a la Universidad Veracruzana por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

## 7. Bibliografía y Referencias

- [1] C. R. Graham, "Blended learning systems". The handbook of blended learning. 2006. Pp. 3-21.
- [2] D. R. Garrison, H. Kanuka, "Blended learning: Uncovering its transformative potential in higher education". The internet and higher education. Vol. 7. No. 2. 2004. Pp. 95-105.
- [3] M. P. Driscoll, A. Vergara, "Nuevas tecnologías y su impacto en la educación del futuro". Pensamiento educativo. Vol. 21. 1997.
- [4] Z. Cataldi, F. Lage, "Trabajando en grupos interactivos a través de herramientas de groupware y redes informáticas para mejorar los aprendizajes y las competencias". Anales de la 32ª JAIIO: Jornadas Argentinas de Investigación Operativa. SSI 2004: Simposio sobre la Sociedad de Información. 2004. Pp. 20-24.
- [5] C. A. Ellis, S. J. Gibbs, G. Rein, "Groupware: some issues and experiences". Communications of the ACM. Vol. 34. No. 1. 1991. Pp. 39-58.

- [6] Skype. <https://www.skype.com/es/>. Mayo 2016.
- [7] Documentos de Google. [https://www.google.com/intl/es-419\\_mx/docs/about/](https://www.google.com/intl/es-419_mx/docs/about/). Mayo 2016.
- [8] Prezentit. <http://www.prezentit.com>. Mayo 2016.
- [9] M. F. Paulsen, "Online Education Systems: Discussion and definition of terms". NKI Distance Education. 2002. Pp. 1-8.
- [10] Moodle. <https://moodle.org/?lang=es>. Abril 2016.
- [11] Blackboard. <http://www.blackboard.com>. Abril 2016.
- [12] Eminus Sistema de Educación Distribuida. <https://eminus.uv.mx/Eminus/default.aspx?ReturnUrl=%2feminus>. Abril 2016.
- [13] Chamilo. <https://chamilo.org/es/chamilo-lms>. Abril 2016.
- [14] Sakai. <https://sakaiproject.org>. Agosto 2016.
- [15] J. Vanderdonckt, G. Calvary, J. Coutaz, A. Stanciulescu, *Multimodal User Interfaces, Signals and Communication Technology Series*. 2008. Springer Berlin Heidelberg. Pp. 61-84.
- [16] S. Mendoza, D. Decouchant, G. Sánchez, J. Rodríguez, A. P. M. Papis, *Digital Information and Communication Technology and Its Applications*. 2011. Springer Berlin Heidelberg. Pp. 380-394.
- [17] D. A. Ávila-Galván, M. C. Mezura-Godoy, G. Sánchez Morales, "Hacia un modelo de desarrollo de software para aplicaciones B-learning adaptables al dispositivo y al entorno". *Tendencias de las Tecnologías de la Información y Comunicaciones*. 2016. Pp. 251-259.
- [18] P. Dourish, V. Belloti, "Awareness and coordination in shared workspaces". *Proceedings of the 1992 ACM conference on computer-supported cooperative work*. 1992. Pp. 107-114.
- [19] J. C. G. Mariño, "B-learning utilizando software libre, una alternativa viable en Educación Superior". *Revista complutense de Educación*. Vol. 17. No. 1. 2006. Pp. 121-133.
- [20] Diseño Centrado en el Usuario (DCU). <http://www.nosolousabilidad.com/manual/3.htm>. Noviembre 2015.

- [21] E. Castillejo, A. Almeida, D. López-de-Ipiña. "Modelling users, context and devices for adaptive user interface systems". *International Journal of Pervasive Computing and Communications*. 2014. Pp. 69-91.
- [22] E. Benítez-Guerrero, C. Mezura-Godoy, L. G. Montané-Jiménez, "Context-aware mobile collaborative systems: Conceptual modeling and case study". *Sensors*. Vol. 12. No. 10. 2012. Pp. 13491-13507.
- [23] L. Balme, A. Demeure, N. Barralon, J. Coutaz, G. Calvary, "Cameleon-RT: A software architecture reference model for distributed, migratable, and plastic user interfaces". *European Symposium on Ambient Intelligence*. 2004. Pp. 291-302.
- [24] X. Wang, Q. Y. Hua, F. Zou, L. Guo, "An adaptive user interface model for mobile devices based on perceptual control theory". *IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science*. 2014. Pp. 908-911.
- [25] M. Kerres, C. D. Witt, "A didactical framework for the design of blended learning arrangements". *Journal of Educational Media*. 2003. Pp. 101-113.
- [26] M. Vasquez Astudillo, *Modelo Salamanca: enfoque pedagógico para el diseño de cursos b-learning en educación superior*. 2015.
- [27] M. S. Wenger, C. Ferguson. "A learning ecology model for blended learning from Sun Microsystems". *The handbook of Blended Learning*. 2006.

## **8. Autores**

L.S.C.A. Dora Angélica Ávila Galván obtuvo su título de Licenciada en Sistemas Computacionales Administrativos otorgado por la Universidad Veracruzana, Xalapa, México. Actualmente es estudiante de la maestría en Sistema Interactivos Centrados en el Usuario por parte de la Universidad Veracruzana.

Dra. María del Carmen Mezura Godoy, Doctora en Informática graduada de la Universidad de Savoie en Francia, con maestría en Inteligencia Artificial por la Universidad Veracruzana y maestría en Informática por la Universidad de Grenoble Francia, es actualmente Profesor de Tiempo completo de la Facultad de Estadística e Informática de la Universidad Veracruzana. Sus áreas de interés son:

CSCW, Interacción Humano Computadora, Sistemas MultiAgentes y Computo Consciente del Contexto.

Dra. Gabriela Sánchez Morales posee el grado de doctora en Ciencias en Computación, otorgado por el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México D.F. Actualmente es investigadora de Cátedras CONACyT con sede en la Universidad Veracruzana. Sus áreas de interés corresponden a: B-learning, CSCW, plasticidad de Interfaces de Usuario e Interacción Humano-Computadora.

# SERVIDOR HTTP SEGURO EN UN SISTEMA EMBEBIDO

**Oscar Alvarado Nava**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*oan@correo.azc.uam.mx*

**Eduardo Rodríguez Martínez**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*erm@correo.azc.uam.mx*

**Hilda María Chablé Martínez**

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco  
*hmcm@correo.azc.uam.mx*

## Resumen

El presente documento describe la implementación de un servidor HTTP con acceso seguro, como un sistema embebido en un FPGA. El acceso al servidor *light http* es a través de un canal basado en *Secure Sockets Layer* (SSL), logrando que el servidor sea capaz de enviar y recibir información cifrada. El servidor almacena y recupera la información de una base de datos relacional implementada en el mismo sistema embebido y administrada por SQLite. El servidor y la base de datos son administrados a través del sistema operativo Linux, el cual fue compilado para el procesador PowerPC incrustado en el FPGA. El sistema muestra que es posible crear un servidor WEB embebido en un FPGA con soporte de bases de datos relacionales y acceso por canales seguros, logrando con ello un mayor nivel de seguridad en el almacenamiento y transmisión de información.

**Palabra(s) Clave(s):** FPGA, HTTPS, Linux, network, OpenSSL, SQLite, security.

## 1. Introducción

EL volumen de información intercambiada a través de los servicios WEB sigue aumentando de manera continua en los últimos años, siendo el comercio



electrónico uno de los principales usos. Los servicios relacionados con el comercio electrónico han generado la necesidad de proteger la integridad, disponibilidad y confiabilidad de la información durante su transmisión y recepción, siendo esta última la parte más vulnerable a amenazas de ataque como *man-in-the-middle* y *eavesdropping*. Estos ataques pueden permitir el acceso a un sitio WEB con información confidencial o interceptar la información enviada por el servidor a un cliente. Una medida para abatir estas amenazas es la creación de canales seguros entre el cliente y el servidor HTTP al cifrar la información. Por otro lado, el desarrollo de aplicaciones de cómputo sobre dispositivos embebidos tiene gran interés para la industria de dispositivos de bajo consumo de energía, ya que permiten crear sistemas de cómputo orientados a una tarea específica sin la necesidad de tener un sistema de cómputo completo. Un dispositivo autónomo capaz de ejecutar un servidor WEB a través de un canal seguro, puede ser de gran utilidad para aumentar la seguridad de los datos, así como minimizar el consumo de energía.

El esquema en capas mostrado en la Figura 1, permite comprender de manera práctica y a la vez concisa, los distintos niveles de abstracción para el diseño y desarrollo de sistemas embebidos.

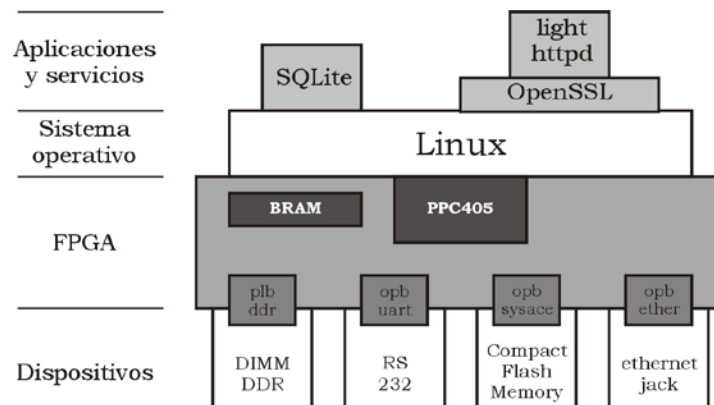


Figura 1 Sistema Embebido en Capas.

En la parte central del esquema se ubica el FPGA, el cual tiene incrustado un procesador de 32 bits (PPC405) y bloques de memoria DRAM (BRAM). A través de los CLBs (*Configurable Logic Blocks*) y los IOBs (*Input-Output Blocks*) del

FPGA, se programan tanto los dispositivos para la entrada y salida de datos como el sistema de buses para la interconexión de los mismos con el procesador. Por medio el procesador incrustado y los bloques de memoria (dentro y fuera del FPGA), ejecutar sistema operativo Linux, el cual es compilado para la arquitectura del procesador y contiene los controladores para el árbol de dispositivos creados. Las bibliotecas, servicios y aplicaciones que se ejecutarán sobre el sistema operativo, se compilan, se cargan y se configuran para generar la funcionalidad que ofrecerá el sistema embebido.

El presente trabajo se centra en la descripción del desarrollo de un sistema embebido basado en un FPGA, en el cual se ejecutan aplicaciones y servicios a través del sistema operativo Linux. Al sistema Linux se integró el servidor `lighttpd` [1], el manejador de base de datos ligero `SQLite` [2] y la biblioteca `OpenSSL` [3] para el cifrado de datos.

El documento está organizado de la siguiente forma: la Sección 2 presenta un estudio de los trabajos relacionados. La Sección 3 describe el sistema y las herramientas para el desarrollo del *hardware* y *software* del sistema embebido.

Los dispositivos que conformarán el sistema embebido y que serán programados dentro del chip del FPGA, se describen en la Sección 4. La Sección 5 describe el *software* del sistema operativo y su configuración. En la Sección 6 se explica la forma de obtener, configurar y compilar los servicios que ofrecerá el sistema embebido. Finalmente, en las Secciones 7 y 8 se describen los resultados y conclusiones respectivamente.

## **2. Trabajos Relacionados**

En los sistemas de automatización es común utilizar los servidores WEB embebidos basados en FPGA para mejorar las funcionalidades de la Interfaz Humano-Computadora. Un protocolo seguro que es capaz de operar con recursos limitados en un sistema embebido es el HTTPS.

En el trabajo propuesto en [4] se describe el desarrollo de un sistema de control y monitoreo en tiempo real utilizando un servidor WEB implementado en el procesador programado (*soft processor core*) `MicroBlaze`. El sistema es capaz de

brindar acceso remoto a los clientes que utilicen un navegador WEB para recibir los enlaces descendentes, enviar comandos por enlace ascendente o actualizar el sistema.

En el trabajo propuesto en [5] se describe un servidor WEB orientado a sistemas operativos ligeros que puedan operar correctamente en una aplicación embebida. El servidor en tiempo real es utilizado para control y acceso de datos remoto. Se analizan dos elementos básicos al implementar el servidor: el desempeño del sistema operativo ligero y el principio de comunicación HTTP. Para satisfacer los requerimientos prácticos de la aplicación, el servidor es diseñado para obtener el mayor desempeño posible con los recursos limitados del sistema.

En el trabajo presentado en [6] se propone una arquitectura de un servidor WEB basado en FPGA eficiente y de bajo costo. Se utiliza el microprocesador 8051 para la ejecución del servidor WEB y los protocolos TCP/IP. Las páginas WEB se transmiten por peticiones HTTP en un módulo de transmisión implementado en Verilog.

Otra métrica de medición importante en las aplicaciones WEB embebidas es el consumo energético. En el trabajo presentado en [7] se presenta un análisis de medición de consumo energético para aplicaciones embebidas web en el área de Internet de las Cosas. Particularmente centra su análisis en el consumo energético utilizando el sistema operativo embebido Contiki para servidores web HTTP.

### **3. Plataforma de Desarrollo**

El proceso de diseño de un sistema embebido considera el desarrollo de *software* y el desarrollo de *hardware*, los cuales pueden darse de manera simultánea o de manera independiente, integrándose en la fase de implementación o programación del dispositivo. Una característica importante de las herramientas de desarrollo actuales, es que es posible desarrollar una aplicación completa sin considerar el dispositivo objetivo, siendo únicamente necesario cambiar algunos parámetros para la implementación del proyecto en un dispositivo con una tecnología específica.

La plataforma de desarrollo fue conformada principalmente por el crosstool-ng [8] y las herramientas de Xilinx ISE (*Integrated Software Environment*) 10.1 y el EDK (*Embed-ded Development Kit*) 10.1, los cuales se instalaron sobre una computadora de escritorio con la distribución Debian GNU/Linux 7.2. El ISE es utilizado para el análisis y síntesis de proyectos desarrollados con lenguajes de descripción de hardware (HDL), el cual incluye simuladores funcionales y analizadores de desempeño en el tiempo. A través del Xilinx EDK se desarrolla tanto el *software* del proyecto como la configuración del sistema cómputo embebido, seleccionado por ejemplo ya sea un *hard processor core* y/o un *soft processor core*; así como la cantidad de bloques de SRAM y los IP (*Intellectual Property*) *cores* que funcionan como periféricos del sistema de cómputo embebido. Una *toolchain* es un conjunto de herramientas de desarrollo de *software* que son ligadas o encadenadas por niveles. Los elementos mínimos son un cargador, un ensamblador, un compilador y bibliotecas de desarrollo. Opcionalmente una *toolchain* puede contener un depurador o un compilador para un lenguaje de programación específico. Generalmente la *toolchain* utilizada para el desarrollo de sistemas embebidos es una *toolchain* cruzada, ya que su compilador soporta compilación cruzada. Al proceso de compilar un programa para una plataforma distinta a la que se lleva a cabo la compilación, se le denomina compilación cruzada.

Para construir la *toolchain* se utilizó buildroot [9] la cual es una herramienta para compilar y generar sistemas de archivos, *kernels* e incluso *bootloaders* con una configuración relativamente sencilla. Buildroot hace uso de busybox [10] que es un conjunto de herramientas populares y acertadamente adaptadas para el desarrollo de sistemas embebidos. Busybox es un binario independiente que proporciona soporte para muchas utilidades comunes de línea de comandos de Linux. La obtención, configuración y compilación se muestra en la figura 2.

Instalar la plataforma de desarrollo sobre un sistema estable, libre y fácilmente replicable como Debian GNU/Linux, es de gran ayuda para obtener las herramientas de *software* básicas y su documentación sin que esto represente un gasto económico extra. Dichas herramientas de *software* van desde un manejador

de versiones distribuido, hasta el uso aplicaciones y herramientas más complejas como un compilador cruzado, depuradores, bases de datos relacionales, etc.

```
1 user@host:~/toolchain$wget http://git.buildroot.net/\
2   buildroot/buildroot-2013.02.tar.bz2
3
4 user@host:~/toolchain$tar -jxvf buildroot-2013.02.tar.bz2
5
6 user@host:~/toolchain$cd buildroot-2013.02
7
8 user@host:~/toolchain/buildroot-2013.02$make menuconfig
9
10 user@host:~/toolchain/buildroot-2013.02$make
```

Figura 2 Obtención y configuración de buildroot.

## 4. Hardware del Sistema

### Tarjeta XUPV2P

Se utilizó la tarjeta desarrollo XUPV2P [11] distribuida por la empresa Digilent [12], la cual cuenta con un FPGA Virtex-II Pro (XC2VP30) y dispositivos para el desarrollo de aplicaciones, destacando 10/100Mbps Ethernet PHY, una ranura para una tarjeta Compact Flash, dos ranuras para DIMMs de memoria DDR-SRAM, y un puerto RS-232, entre muchos otros.

Para generar el árbol de dispositivos a través del *Board Support Package* (BSP) del EDK, se utiliza el *Device Tree Generator* el cual se puede obtener a través de la herramienta git en el sitio Github de Xilinx [13]. Además es necesario los archivos de configuración de la tarjeta de desarrollo. En la figura 3 se muestra las líneas de comando para obtener las herramientas y los archivos de configuración del *hardware* de la tarjeta de desarrollo. Cabe mencionar que es necesario obtener una licencia de uso para el dispositivo OPB\_ETHERNETLITE, esta solicitud se hace en el sitio de Xilinx con registro previo.

```
1 user@host:~/xup2vp$git clone git://github.com/xilinx/\
2   device-tree.git
3
4 user@host:~/xup2vp$wget http://www.digilentinc.com/\
5   Data/Products/XUPV2P/EDKXUP-V2ProPack.zip
```

Figura 3 Herramientas y archivos para la creación del árbol de dispositivos.

### Sistema en un chip

El FPGA XC2VP30 además de contar con una gran densidad de CLBs para la implementación de circuitos digitales, tiene incrustados dos *hard core* PowerPC-

405 y varios bloques de SRAM que en conjunto suman 2 MBytes. Para que este sistema CPU-RAM sea capaz de ejecutar programas más grandes y complejos, como un sistema operativo moderno, es necesario incluir módulos DDR-SRAM en las ranuras de la tarjeta XUPV2P.

La elección del tipo procesador (*hard core* o *soft core*) es relevante tanto para el desempeño y como para la utilización de recursos del FPGA. Por ejemplo, al utilizar un *hard core* permite la inclusión de más componente de *hardware* o periféricos, proporcionando una mayor funcionalidad al proyecto. Además de la elección del procesador, es necesario generar el árbol de dispositivos dentro del proyecto de *hardware*.

En el FPGA XC2VP30 se creó el sistema de cómputo embebido mostrado en la figura 4, el cual está compuesto del *hard core* PowerPC 405 a 400Mhz (ppc405), todos los bloques de memoria SRAM *On-Chip* de 128KBytes (bram\_block) con su respectivo módulo de acceso al bus (plb\_ram), un sistema de buses jerárquico compuesto del bus local del procesador (plb), del bus de periféricos en chip (opb) junto con sus respectivos árbitros y un puente entre buses (plb2opb). Para el almacenamiento de la información fue necesario agregar el módulo (opb\_sysace) para el acceso a un sistema de archivos ext2 sobre una *Compact Flash Memory* de 1 GByte. Así mismo, para poder ejecutar el sistema operativo Linux se agregó al espacio de direcciones del procesador un módulo de memoria externo DIMM DDR SDRAM de 256 MBytes (plb\_dds). Se incluyó un transmisor-receptor serial para la entrada y salida estándar del sistema (opb\_uart). El *hardware* anterior y sus parámetros de configuración se listan en el archivo xilinx.dts, generado por el EDK.

## 5. Software del Sistema

### Linux Kernel

El sistema operativo Linux deberá ser compilado para la arquitectura objetivo, ya sea para el PowerPC o para el *soft core* MicroBlaze [14], así mismo deberá contener los controladores para el árbol de periféricos configurado.

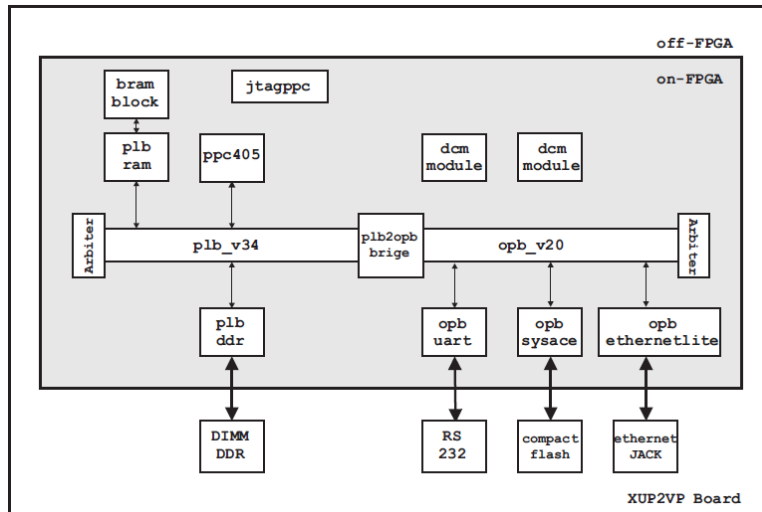


Figura 4 Hardware del sistema embebido basado en un FPGA.

Las fuentes del *kernel* de Linux se pueden obtener del sitio oficial [15], sin embargo, para este proyecto utilizamos la versión *linux\_xlnx*, la cual es una versión del *kernel* 3.2 modificada para sistemas embebidos y soporta el *hardware* mostrado en figura 4. Para que el *kernel* pueda ser cargado, es necesario un *ramdisk*, el cual es un sistema de archivos en memoria. Ambos elementos también están disponible en el Github y el repositorio de binarios de Xilinx.

Las líneas 1 y 4 de la figura 5 muestran los comandos para obtener las fuentes del *kernel* y el *ramdisk*. La línea 10 de la misma figura 5 indica cómo se lleva a cabo la relación del *hardware* y las fuentes del sistema operativo, solamente es necesario copiar el archivo que contiene la configuración del árbol de dispositivos con el prefijo *virtex405-* y el *ramdisk*, al directorio de arranque.

```

1 user@host:~/kernel$git clone git://github.com/xilinx/\
2   linux-xlnx.git
3
4 user@host:~/kernel$wget http://xilinx.wdfiles.com/\
5   local-files/powerpc/linux/ramdisk.image.gz
6
7 user@host:~/kernel$cp ~/xup2vp/xilinx.dts\
8   linux-xlnx/arch/powerpc/boot/dts/virtex405-https.dts
9
10 user@host:~/kernel$cp ramdisk.image.gz\
11   linux-xlnx/arch/powerpc/boot

```

Figura 5 Kernel Linux y sistema de archivos en RAM y relación con hardware del sistema.

El *kernel* de Linux tendrá los subsistemas principales, como el *Scheduler*, el *Virtual File System*, el *Memory Manager* y el *Inter Process Communication*, así como los controladores necesarios para el acceso a los dispositivos. Ya que los controladores pueden ocupar una gran parte de la imagen, es importante configurar adecuadamente los parámetros de compilación para soportar sólo *hardware* seleccionado y las funcionalidades del *kernel* necesarias en el proyecto. Para la compilación cruzada del *kernel* de Linux, es necesario crear variables de ambiente para que la *toolchain* acceda a las herramientas y configuraciones. En la figura 6 se muestra un fragmento del contenido del archivo `ambiente.sh` el cual crea el ambiente para la compilación cruzada.

```
1 unset CC CXX CPP CFLAGS INCLUDES CXXFLAGS LD_LIBRARY_PATH
   LIBRARY_PATH CPATH
2 export CC CXX CPP CFLAGS INCLUDES CXXFLAGS LD_LIBRARY_PATH
   LIBRARY_PATH CPATH
3 unset ARCH
4 export ARCH=powerpc
5 unset CROSS_COMPILE
6 export CROSS_COMPILE=powerpc-linux-gnuexport
7 PATH=/path/to/toolchain/bin:$PATH
```

Figura 6 Archivo `ambiente.sh`.

La figura 7 muestra los comandos para la configuración y compilación cruzada del *kernel* de Linux.

```
1 user@host:~/linux-xlnx$source ~/toolchain/ambiente.sh
2
3 user@host:~/linux-xlnx$source ~/Xilinx/settings.sh
4
5 user@host:~/linux-xlnx$source ~/EDK/settings.sh
6
7 user@host:~/linux-xlnx$make menuconfig
8
9 user@host:~/linux-xlnx$make simpleImage.initrd.virtex405-
   https
10
11 user@host:~/linux-xlnx$cp arch/powerpc/boot/\
12   simpleImage.initrd.virtex405-https.elf ~/xupv2p
```

Figura 7 Comandos para la compilación cruzada del *kernel* de Linux.

El resultado de la compilación es la imagen `vmlinux` y los archivos `System.map` y `simpleImage.initrd.virtex405-nombre.elf`, el cual deberá ser copiado al proyecto creado en el EDK y así pueda ser programado al FPGA a través del sistema SysACE o XDM.



## Root file system

Un sistema de archivos jerárquico o *Root File System* (RFS), es la clasificación de los archivos de las aplicaciones por su tipo, función y acceso de acuerdo a un estándar. El RFS es una parte muy importante en el desarrollo de un sistema embebido basado en el *kernel* de Linux, ya que a diferencia de otros sistemas operativos embebidos, Linux requiere de un sistema de archivos para funcionar. Ya que el espacio de almacenamiento también es limitado en un sistema embebido, el crear un sistema de archivos pequeño, pero suficiente para almacenar los archivos necesarios ha sido una gran preocupación para los desarrolladores. El *Filesystem Hierarchy Standard* (FHS) [16] establece el sistema de archivos mínimo con el que debe contar un sistema Linux para poder funcionar, el cual es mostrado en la tabla 1.

Tabla 1 Sistema de Archivos Mínimo.

Directorio	Descripción
/bin	Comandos comunes, compartidos por el administrador y los usuarios del sistema.
/dev	Referencias a todos los periféricos de hardware que son representados como archivos especiales
/etc	Principales archivos de configuración tanto para aplicaciones del sistema como de servicios
/lib	Archivos bibliotecas de aplicaciones de sistema
/sbin	Aplicaciones para el sistema y el administrador
/tmp	Espacio para archivos temporales
/var	Archivos de sistema y de usuarios de tamaño variable como bitácoras, spoolers, etc.

El *kernel* podría ser compilado para contener una versión comprimida del RFS y de esta forma no necesitar de un dispositivo externo para almacenar los archivos, de manera similar a cómo funcionan los sistemas operativos *live*. A pesar de que con un RFS cargado en memoria se podría obtener una mejora en el rendimiento y en el almacenamiento, no siempre es recomendable ya que, si no se hace un análisis minucioso de los archivos requeridos, la imagen podría alcanzar un

tamaño considerable y consecuentemente no podría cargarse en la limitada RAM del sistema embebido.

La solución comúnmente utilizada para poder contar con un sistema de archivos completo, es crear inicialmente un sistema de archivos pequeño en un dispositivo de arranque (como una memoria flash) y posteriormente montar un sistema de archivo más grande almacenado en otro dispositivo de mayor capacidad, o incluso montarlo desde un servidor NFS a través de una red de datos. El RFS se puede montar desde el proceso de arranque del *kernel* al indicarle por medio del *Kernel Command Line* (KCL) el dispositivo y en el cual está el RFS.

En el presente proyecto se creó un sistema de archivos mínimo almacenado en una partición ext2 de 750MB sobre una Compact Flash de 1 GByte. Las principales aplicaciones utilizadas en el proyecto se listan en la tabla 2.

Tabla 2 Aplicaciones utilizadas en el proyecto.

Tamaño	Empleo
OpenSSL	Conjunto de bibliotecas de criptografía.
OpenSSH	Conjunto de herramientas de para la comunicación segura en redes.
lighttpd	Servidor web ligero.
tcl	Lenguaje de script de sintaxis sencilla
sqlite3	Sistema ligero de gestión de para bases de datos relacionales
dhclient	Cliente DHCP
iptables	Programa de usuario y módulo del kernel para la administración de firewalls

### **Handering**

Una vez programado el FPGA y lanzado el sistema operativo, se realizan configuraciones propias del sistema, las cuales van desde la seguridad del mismo hasta el inicio ordenado de los servicios. Las configuraciones se realizan por medio de *scripts* de *shell* y se encargan de probar e iniciar dispositivos, acceder a archivos de configuración, lanzar las aplicaciones e iniciar bitácoras.

Las primeras configuraciones consisten en la fortificación o disminución de la vulnerabilidad del propio sistema (*Hardening*), el cual consiste por ejemplo, en

deshabilitar o remover servicios innecesarios e iniciar en una secuencia adecuada los servicios que se requieren para que el sistema realice su función. Una vez iniciado el servicio de red, se activa un *firewall* a través *iptables*. Las reglas en *iptables* tienen la siguiente finalidad: filtrar o desechar todo el tráfico que no esté asociado a algún servicio activo en el sistema, el reenvío (*forwarding*) de paquetes queda deshabilitado y todo el tráfico saliente del sistema es permitido. Adicionalmente se activa en el *kernel* del sistema el *Reverse Path Filtering* (*rp\_filter*) para evitar ataques de suplantación (*spoofing*) dentro de la red en la que se encuentra el sistema embebido. Así, solo se permite el tráfico de *loopback* y de los servicios SSH y el servicio HTTPS creado. El servicio SSH permite tanto la administración del sistema de manera remota como el envío y recepción segura de archivos.

## 6. Servicios y Aplicaciones

Las servicios y aplicaciones que se ejecutarán en el sistema embebido, deberán ser compilados (de manera cruzada) y agregados en el sistema de archivos del sistema embebido. Esta compilación se puede hacer cuando se está creando el sistema de archivos del sistema, como se describió en la Sección 5-B, o bien se puede compilar por separado y copiar los binarios al sistema de archivos.

Debe ser claro que para cada servicio, se deberán de resolver las dependencias que requieran, esto es, se deberá agregar el código dependiente para su compilación en el orden necesario y su posterior enlazado. En las secciones siguientes se comentará los detalles para la compilación de los principales servicios.

### OpenSSL

OpenSSL es esencialmente un conjunto de bibliotecas para el cifrado de datos y herramientas con las cuales es posible la implementación SSL. Las bibliotecas de cifrado nos ofrece los algoritmos más utilizados para cifrado simétrico y de llave pública, algoritmos *hash* y para resumen de mensajes. Incluye también un

generador de números pseudoaleatorios y soporte para la manipulación de formatos comunes de certificados y material para el manejo de claves.

El código fuente de OpenSSL se puede obtener del sitio oficial o de alguna distribución de Linux. Por ejemplo, se puede extraer el código fuente de los paquetes de Linux Debian para PowerPC ejecutando los comandos que se muestran en la figura 8. Es necesario considerar las dependencias del código, en este caso, libssl, libssl-dev y xlib1g. Para la compilación de código y enlazado de módulos de la biblioteca OpenSSL, se carga el ambiente de la *toolchain* cruzada para su ejecución. El comando mostrado línea 3 de figura 9, compila el código del servidor HTTPS y lo enlaza con la biblioteca de OpenSSL.

```
1 user@host:~/ssl$wget http://ftp.us.debian.org/debian/\
2   pool/main/o/openssl/\
3   libssl0.9.8_0.9.8o-4squeeze14_powerpc.deb
4
5 user@host:~/ssl$dpkg -x
6   libssl0.9.8_0.9.8o-4squeeze14_powerpc.deb ./
```

Figura 8 Comandos para obtener el código fuente de OpenSSL para PowerPC.

```
1 user@host:~/ssl$source ~/toolchain/ambiente.sh
2
3 user@host:~/ssl$powerpc-linux-gnu-gcc -Wall\
4   common.c server.c wserver.c -o httpsServer\
5   -pthread -lssl -lcrypto
```

Figura 9 Compilación cruzada y enlazado de biblioteca de OpenSSL.

Finalmente, los binarios y sus archivos de configuración, son copiados al sistema de archivos del sistema embebido como se muestra en la figura 10.

```
1 user@host:~/ssl$mount /dev/'deviceCompactFlash' /mnt
2
3 user@host:~/ssl$mkdir /mnt/root/servicio
4
5 user@host:~/ssl$cp httpsServer\
6   dhparam.pem root.pem server.pem\
7   /mnt/root/servicio/
```

Figura 10 Compilación cruzada y enlazado de biblioteca de OpenSSL.

## SQLite

SQLite es un motor de bases de datos relacionales para sistemas de bajos recursos. Lo que hace diferente a SQLite es que un solo proceso realiza lecturas y escrituras directamente sobre los archivos que contiene la base de datos. Esto reduce el tiempo de acceso a la base de datos debido a que no hay comunicación entre procesos. Además, debido a que es un conjunto de funciones, es ideal para sistemas de bajos recursos, como los sistemas embebidos.

Se creó una base de datos que contiene información que podemos considerar confidencial que será accedida por el servidor HTTPS con sentencias SQL y serán enviadas al cliente a través de funciones OpenSSL. De forma similar a OpenSSL, el código de SQLite se obtiene, se compila y se copia al sistema de archivos del sistema embebido.

## Servidor HTTPS

Un servidor HTTPS es una versión segura de un servidor HTTP, ya que implementa un canal de comunicación basado en SSL entre el navegador del cliente y el servidor HTTP. Este canal requiere que antes del envío de datos, el servidor y el cliente realizan siguiente negociación:

- El cliente envía al servidor las opciones de cifrado, compresión y versión de SSL junto con algunos bytes aleatorios llamados *Challenge* de Cliente.
- El servidor selecciona las opciones de cifrado, compresión y versión de SSL entre las que ha ofertado el cliente y le envía su decisión y su certificado.
- Servidor y cliente negocian la clave secreta llamada *master secret*.
- Utilizando la clave *Challenge* de Cliente y las opciones pactadas, se envía la información cifrada.

Un certificado de clave pública es un documento que certifica que el interlocutor es quien realmente dice ser, esto se hace para evitar que un atacante pueda hacerse pasar por el servidor y recibir la comunicación segura en su lugar. Estos certificados pueden generarse con herramientas de OpenSSL y para una mayor seguridad pueden ser firmados por una autoridad certificadora, por ejemplo:

*VeriSign, Thawte, GoDaddy* o *GeoTrust*. Los certificados también pueden ser auto-firmado, pero el cliente no tendrá total seguridad que la información está siendo enviada al servidor correcto y recibirá un llamativo aviso en su navegador de que el certificado no es de confianza.

En la figura 11 se muestra a manera de ejemplo, los comandos para crear el certificado del servidor y firmarlo con Autoridad Certificadora (CA) del servidor utilizando las herramientas de OpenSSL.

```
1 user@host:~/xup2vp/certificados$openssl req -newkey\  
2   rsa:1024 -sha1-keyout serverkey.pem -out serverreq.pem  
3  
4 user@host:~/xup2vp/certificados$openssl x509 -days 3650\  
5   -req -in serverreq.pem -sha1 -extfile\  
6   /etc/ssl/openssl.cnf -extensions\  
7   usr_cert-CA serverCA.pem -CAkey serverCA.pem\  
8   -CAcreateserial -out servercert.pem  
9  
10 user@host:~/xup2vp/certificados$cat servercert.pem\  
11   serverkey.pem serverCAcert.pem\  
12   rootcert.pem >> server.pem  
13  
14 user@host:~/xup2vp/certificados$openssl x509 -subject\  
15   -issuer -noout -in server.pem
```

Figura 11 Creación de Certificados con OpenSSL.

La implementación del servidor HTTPS se logró al agregar al código del servidor *lighttpd* una capa de seguridad implementada con las funciones de OpenSSL. A continuación, se hace una breve descripción de la creación de la capa de seguridad. Inicialmente se crea un contexto de seguridad (*SSL\_CTX*) y se le cargan las bibliotecas (*SSL\_load\_error\_strings()*) necesarias. Después se hace la autenticación con los certificados (*SSL\_CTX\_use\_certificate\_chain\_file()*), las llaves (*SSL\_CTX\_use\_PrivateKey\_file()*) y los *passwords* (*SSL\_CTX\_set\_default\_passwd\_cb()*).

## 7. Resultados

Una vez programado el hardware en el FPGA, se lanza el *kernel* de Linux y crea los servicios básicos a través de sus archivos de configuración. El servicio

HTTPS se puede lanzar de manera manual o de manera automática por medio de un script.

Una vez generada la solicitud de un cliente y antes de realizar la transferencia de información se establece un *handshake* en el cuál se negocian y se establecen los parámetros e intercambio de claves que se utilizarán para el transporte de nuestra información y creando así, para nuestro caso, un canal de comunicación seguro bajo OpenSSL.

Una vez que ha terminado la negociación, se recibe y analiza la solicitud dando paso a la consulta en nuestra base de datos por medio de una sentencia SQL de donde es extraída la información solicitada en caso de existir. Realizada nuestra consulta se procede a dar respuesta a la solicitud, enviando la información requerida al cliente para posteriormente cerrar el canal de comunicación. Este proceso se lleva a cabo por cada petición de información al servidor, el cuál fue diseñado para atender solicitudes concurrentemente. En la figura 12 se muestra un fragmento de la bitácora del servidor.

```
1 [root@xupv2p servidor]#./https
2
3 *****
4 Escuchando por el puerto 4433...
5 GET /index.html HTTP/1.1
6 Host:192.168.1.9:4433
7 User-Agent:Mozilla/5.0 (X11; Linux i686; rv:24.0) Gecko
  /20100101 Firefox/24.0
8 Accept: text/html, application/xhtml+xml,application/xml;q
  =0.9,*/*;q=0.8
9 Accept-Lenguaje: es-MX,es-ES;q=0.8,es-AR;q=0.7,es;q=0.5,en-
  US;q=0.3,en;q=0.2
10 Accept-Encoding: gzip, deflate
11 Connection: keep-alive
12 If-Modified-Since: Wed 19 Mar 2014 01:34:12 GMT
13 Cache-Control: max-age=0
14 Ejecutando SQL (select from )...
```

Figura 12 Bitácora del HTTPS.

## 8. Análisis de Resultados

La implementación del servidor HTTPs presentada, está totalmente apegada al RFC5246 (The Transport Layer Security (TLS) Protocol v1.2) el cual utiliza un intercambio de llaves con el algoritmo Delfie-Hellman y cifrado asimétrico con RSA. Ambos algoritmos requieren aritmética entera, por lo que la carencia de un

FPU (Unidad de número de Punto Flotante) en el procesador incrustado PPC405 no implican una diferencia importante en cuanto al desempeño del sistema, sin embargo, hay una serie de aspectos técnicos que si influyen en el rendimiento del sistema desarrollado en comparación con un sistema de cómputo convencional. Uno de los más evidentes es la diferencia entre las frecuencias de operación entre los distintos procesadores, el procesador embebido PPC405 tiene una frecuencia de operación de entre 100MHz y 500MHz máximo, siendo la frecuencia de operación recomendada de 200Mhz, mientras que por ejemplo un procesador Intel Atom x86 de gama baja, tiene una frecuencia de operación mínima de 1.6GHz. La interfaz de red en un sistema de cómputo convencional es dedicada y en muchas ocasiones está integrada con la tarjeta madre a un bus de alta velocidad. En el sistema embebido presentado, la parte que implementa la interacción con los protocolos de la capa de enlace de datos están implementadas dentro de un módulo instanciado en los CLBs del FPGA, los módulos con mejor rendimiento son propietario y tienen un costo y no estuvieron disponibles para este trabajo.

## **9. Conclusiones**

El presente proyecto demuestra que es posible crear un servicio HTTPS con acceso a una base de datos relacional en un solo chip. Enlazando bibliotecas orientadas al cifrado, fue posible crear un canal de comunicación seguro y siendo la seguridad un tema central en nuestros días, es una alternativa para crear aplicaciones que requieren confidencialidad de datos.

Al estar embebido en un chip el servicio HTTPS adquiere grandes ventajas, entre ellas, un bajo consumo de energía y un nivel de vulnerabilidad mínimo. Además, al contar con un sistema operativo el sistema embebido logra una gran flexibilidad en su configuración y modificación, permitiendo mejorar su funcionamiento en un tiempo de desarrollo corto.

El sistema descrito fue desarrollado en un FPGA ejecutando Linux, sin embargo, con los IDEs de desarrollo actuales es posible migrar fácilmente el proyecto a otras arquitecturas o plataformas más poderosas y populares como MIPS o ARM y ganar con ello un valor agregado en la industria.



Es importante señalar que generalmente el precio a pagar por una gran flexibilidad, es un impacto negativo sobre el rendimiento del sistema. Por ejemplo, el uso de un lenguaje de programación interpretado ayuda en la integración de aplicaciones mejorando el tiempo de desarrollo, pero debido a las numerosas capas de *software* necesarias, aumenta el tiempo de ejecución de la aplicación.

## 10. Trabajo Futuro

Una posibilidad es instanciar varios procesadores *soft core* en un FPGA con mayor densidad de CLBs, y asignar cada uno de ellos un servicio, utilizando un *kernel* con soporte *Symmetric Multi Processing*. Otra posibilidad es utilizar procesadores incrustados con mayores recursos, como ejecución superescalar y crear servidores multihilo. Aumentar el nivel de seguridad con llaves de mayor longitud, verificadas por coprocesadores programados en el hardware del FPGA.

## 11. Bibliografía y Referencias

- [1] Home – lighttpd – fly light. <http://www.lighttpd.net/>. Jan. 2014.
- [2] Sqlite home page. <http://www.sqlite.org/>. Jan. 2014.
- [3] R. S. Engelschall. Openssl: The open source toolkit for ssl/tls. <http://www.openssl.org/>. Jan. 2014.
- [4] A. Hanafi, M. Karim, "Embedded web server for real-time remote control and monitoring of an FPGA-based on-board computer system". Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV). Fez. 2015. Pp. 1-6.
- [5] L. L. Wang, P. F. Zeng, "A lightweight operating system-oriented web server realization". Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP). 10th International Computer Conference on, Chengdu. 2013. Pp. 186-190.
- [6] J. Zhang, J. Tian, "Design and implementation of an efficient web server based on FPGA". Computer Science and Network Technology (ICCSNT), 2nd International Conference on, Changchun. 2012. Pp. 172-175.

- [7] N. Cherifi, G. Grimaud, T. Vantroys, A. Boe, "Energy Consumption of Networked Embedded Systems". 3rd International Conference on Future Internet of Things and Cloud (FiCloud). 2015. Pp. 639-644.
- [8] Crosstool ng. <http://www.crosstool-ng.org/>. Jan. 2014.
- [9] E. Andersen. Buildroot. <http://buildroot.uclibc.org/>. Jan. 2014.
- [10] Busybox. <http://busybox.net/>. Jan. 2008.
- [11] Xupv2p documentation. <http://www.xilinx.com/univ/xupv2p.html>. Jan.2012.
- [12] D. Inc. Digilent Inc. - digital design engineer's source. <http://www.digilentinc.com/>. Jan. 2014.
- [13] K. Sievers. Xilinx github. <https://github.com/xilinx>. Jan. 2014.
- [14] Xilinx. Microblaze soft processor. <http://www.xilinx.com/tools/microblaze.htm> Jan. 2012.
- [15] Linux Kernel Organization. The linux kernel archive. <http://www.kernel.org/>. Jan. 2014
- [16] D. Quinlan. Filesystem hierarchy standard. <http://www.pathname.com/fhs>. Jan. 2004.