

# PISTAS

## Educativas

VOLUMEN 40 • No. 130 • NOVIEMBRE 2018 • ISSN: 2448-847X

Número Especial  
Difusión del Conocimiento

SEP  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO**



## **PISTAS EDUCATIVAS**

Pistas Educativas, Año 2018, No. 130, número especial (Divulgación del Conocimiento), publicada y editada por el Tecnológico Nacional de México dependiente de la Secretaría de Educación Pública, a través del Instituto Tecnológico de Celaya, Arcos de Belén Núm. 79, piso 3, Colonia Centro, Delegación Cuauhtémoc, CP 06010, Ciudad de México, Tel. 5536011000 Ext. 65064,

*d\_vinculacion05@tecnm.mx*, Editor Responsable Héctor Rojas Garduño. **Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-120613261600-203, ISSN: 2448-847X**, ambos son otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número Julián Ferrer Guerra, Antonio García Cubas Pte #600 esquina Av. Tecnológico, Colonia Alfredo V. Bonfil, CP 38010, Celaya, Gto, Tel. 4616117575 Ext 5106, noviembre 2018.

Pistas Educativas es un espacio de libertad intelectual con responsabilidad; más allá del compromiso adquirido de formar ingenieros y administradores competentes, está el mandato constitucional para toda institución educativa de promover el desarrollo armónico de todas las facultades del ser humano y de educar para la democracia, como un sistema.

Las publicaciones de los artículos sometidas a revisión por pares abierta y el contenido es responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Queda prohibida la reproducción parcial o total de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto encargado o si lo permite poner las condiciones.

## **DIRECTORIO TecNM**

**Manuel Quintero Quintero**

Director



## **DIRECTORIO TecNM en Celaya**

**Ignacio López Valdovinos**

Director

**José Antonio Vázquez López**

Subdirector Académico

**Martín Campos Moreno**

Subdirector de Servicios Administrativos

**Teresita de las Nieves Armengol Rico**

Jefe Departamento de Desarrollo Académico



**PISTAS EDUCATIVAS**

*pistaseducativas@itcelaya.edu.mx*

# **PISTAS** **Educativas**

## ***Director***

MC. Julián Ferrer Guerra  
*Tecnológico Nacional de México en León*

## ***Editor Responsable***

Ing. Héctor Rojas Garduño  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

## ***Consejo Editorial***

Dra. Martha Ríos Manríquez  
*Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra*

Dr. José Antonio Vázquez López  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

MDPH. Teresita de las Nieves Armengol Rico  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

## ***Comité Científico***

Dra. María Sánchez Fernández  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

M.C. Julio Armando Asato España  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

Dra. Karla Judith Moreno Bello  
*Universidad de la Coruña, España*

Dr. José Porfirio González Farías  
*Tecnológico Nacional de México en Celaya*

## PISTAS EDUCATIVAS

### No. 130 Número Especial (Difusión del conocimiento)

#### Contenido

<b>EDITORIAL</b> .....	<b>1</b>
<b>PRESENTACIÓN CIER 2018</b> .....	<b>2</b>
<b>EL INCREMENTO DE TECNOLOGÍAS RENOVABLES DE GENERACIÓN ELECTRICA EN LAS NACIONES SUDAMERICANAS, ANTE EL FENÓMENO ENOS (THE INCREASE OF RENEWABLE TECHNOLOGIES GENERATION IN THE SOUTH AMERICAN NATIONS, GIVEN THE ENOS PHENOMENON)</b> <i>José Antonio Aquino Robles, Cecilia Fernández Nava, Leonel G. Corona R.</i> .....	<b>3-20</b>
<b>LOS SERVICIOS AUXILIARES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EN PRESENCIA DE GRAN CANTIDAD DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA DE BAJA POTENCIA (THE AUXILIAR SERVICES IN NETWORKS OF ELECTRIC DISTRIBUTION IN PRESENCE OF A GREAT QUANTITY OF LOW POWER FOTOVOLTAIC GENERATION)</b> <i>José Antonio Aquino Robles, Cecilia Fernández Nava, Leonel Corona R.</i> .....	<b>21-38</b>
<b>INTEGRACIÓN DE TOPOLOGÍAS PARA ALUMBRADO PÚBLICO E INYECCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A LA RED A PARTIR DE UN PANEL FOTOVOLTAICO (INTEGRATION OF TOPOLOGIES FOR PUBLIC LIGHTING AND INJECTION OF ELECTRICAL ENERGY TO THE NETWORK FROM A PHOTOVOLTAIC PANEL)</b> <i>Jesús Uriel Baltazar Hernández, Elías José Juan Rodríguez Segura, José Antonio Beristáin Jiménez</i> .....	<b>39-53</b>
<b>CONSTRUCTION OF A CURRENT-FED PUSH-PULL CONVERTER: PRACTICAL CONSIDERATIONS (CONSTRUCCION DE UN CONVERTIDOR PUSH-PULL ALIMENTADO EN CORRIENTE: CONSIDERACIONES PRÁCTICAS)</b> <i>Ibsan Ulises Castillo Zamora, Adyr Andrés Estévez de Bén, Alfredo Alvarez Díaz-Comas, Juan José Elías Rodríguez Segura</i> .....	<b>54-69</b>
<b>ARRANQUE DE UN GASIFICADOR A NIVEL LABORATORIO UTILIZANDO RESIDUOS DE PODA (STARTING A GASIFIER AT LABORATORY LEVEL USING WASTE OF PODA)</b> <i>Sergio Omar Castro Martínez, Alejandra Castro González</i> .....	<b>70-89</b>
<b>REDUCCIÓN DE CORRIENTE DE FUGA EN INVERSOR TRIFASICO PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS (DECREASE OF THE LEAKAGE CURRENT ON THREE-PHASE INVERTER FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS)</b> <i>Elizabeth Espitia, Héctor López, Nimrod Vázquez, Joaquín Vaquero</i> .....	<b>90-100</b>
<b>IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA DE CELDAS FOTOVOLTAICAS ORGÁNICAS OPTIMIZADAS (ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE OF OPTIMIZED ORGANIC PHOTOVOLTAIC PANELS)</b> <i>Juan Carlos Gallegos Mendoza, Domingo Rangel Miranda, Rogelio Rodríguez Talavera, Susana Vargas Muñoz</i> ..	<b>101-116</b>
<b>SISTEMA DE CONTROL DE RIEGO CON FUNCIONES DE MONITOREO PARA CULTIVOS HIDROPÓNICOS BASADO EN EL MÉTODO DE BANDEJA DE DEMANDA (IRRIGATION CONTROL SYSTEM WITH MONITORING FUNCTIONS FOR HYDROPONIC CROPS BASED ON THE DEMAND TRAY METHOD)</b> <i>Juan Carlos Gómez Cortés, Daniel Rodríguez Mercado, José Javier Díaz Carmona</i> .....	<b>117-131</b>
<b>ANÁLISIS TÉRMICO DE LOS SUBSISTEMAS ELECTRÓNICOS EN UN RECINTO DE CANSAT (THERMAL ANALYSIS OF ELECTRONIC SUBSYSTEMS IN A CANSAT ENCLOSURE)</b> <i>Antonio Gómez Roa, José Cruz Núñez Pérez, Andrés Calvillo Téllez</i> .....	<b>132-141</b>
<b>PRONÓSTICO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DE CORTO PLAZO DE UN PARQUE EÓLICO, UTILIZANDO TÉCNICAS NUMÉRICAS DE PREDICCIÓN DEL CLIMA (SHORT-TERM ELECTRICITY GENERATION PROGNOSTIC OF A WIND FARM, USING WEATHER PREDICTION NUMERICAL TECHNIQUES)</b> <i>Georgina Lizeth González González, Antonio Rodríguez Martínez, Gabriel Cuevas Figueroa, Uriel Lezama López</i> .....	<b>142-151</b>
<b>TRANSMISIÓN DE IMÁGENES USANDO SISTEMAS CAÓTICOS SNLF MULTI-ENRROLLAMIENTO Y MULTI-DIRECCIÓN (TRANSMISSION OF IMAGES USING MULTI-SCROLL AND MULTI-DIRECTION SNLF CHAOTIC SYSTEMS)</b> <i>José Cruz Núñez Pérez, Vincent Ademola Adeyemi, Francisco Javier Pérez Pinal, Aldo Bonilla Rodríguez, Gamaliel Entrambasaguas León, Rodrigo Yaocztzin Serrato Andrade</i> .....	<b>152-172</b>
<b>ESTRATEGÍA DE CONTROL MEDIANTE FUNCIÓN DE LYAPUNOV PARA CONVERTIDORES MONOFÁSICOS CD/CA EN SISTEMAS FOTOVOLTAICOS (CONTROL STRATEGY BY LYAPUNOV FUNCTION FOR SINGLE-PHASE CD/CA CONVERTERS IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS)</b> <i>Daniel Palomares, Claudia Hernández, Joaquín Vaquero, Nimrod Vázquez</i> .....	<b>173-191</b>

<b>CONTROL PREDICTIVO PONDERADO APLICADO A UN CONVERTIDOR MULTINIVEL MODULAR CONECTADO A LA RED (WEIGHTED PREDICTIVE CONTROL APPLIED TO A MULTILEVEL CONVERTER CONNECTED TO THE NETWORK)</b> <i>Luis Antonio Ramírez Arredondo, Nimrod Vázquez Nava, Joaquín Vaquero López.....</i>	<b>192-207</b>
<b>OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR DE 2MW, MEDIANTE UN MODELO CFD (OBTAINMENT OF THE POWER CURVE OF A WIND TURBINE 2MW, THROUGH A CFD MODEL)</b> <i>Emmanuel Rodríguez S., Laura L. Castro G., Guillermo Santamaría B., Uriel Lezama L.....</i>	<b>208-220</b>
<b>DISEÑO DE OSCILADORES CAÓTICOS DE CHUA EN MATLAB, MULTISIM Y DSP-BUILDER (DESIGN OF A CHAOTIC OSCILLATORS OF CHUA IN MATLAB, MULTISIM AND DSP-BUILDER)</b> <i>Jesús Osvaldo Sandoval Solís, Fernando Salas Medina, Jorge Fernando Cortés Avilez, Kenia Itzel Vázquez López, Francisco Javier Pérez Pinal, Andrés Calvillo Telléz, José Cruz Núñez Pérez.....</i>	<b>221-235</b>
<b>PRESENTACIÓN SENIE 2018.....</b>	<b>236</b>
<b>CERTIFICACIÓN EN JAVA DE LAS COMPETENCIAS EN PROGRAMACIÓN DE COMPUTADORAS DE LOS ESTUDIANTES DE LA LICENCIATURA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS (CERTIFICATION IN JAVA OF COMPETENCES IN COMPUTER PROGRAMMING OF THE COMPUTATIONAL SYSTEMS PROGRAM STUDENTS AT THE AUTONOMOUS UNIVERSITY OF CHIAPAS)</b> <i>Luis Antonio Álvarez Oval, Christian Mauricio Castillo Estrada, Erwin Bermúdez Casillas.....</i>	<b>237-251</b>
<b>SOLUCIÓN NUMÉRICA Y LINEALIZADA DE UN MODELO DE SISTEMA PLANAR AUTÓNOMO NO LINEAL, PARA UN EQUIPO DE DOS TANQUES INTERCONECTADOS (NUMERICAL AND LINEARIZED SOLUTION OF A MODEL OF AN AUTONOMOUS, NON-LINEAR PLANAR SYSTEM, FOR A TWO INTERCONNECTED TANKS EQUIPMENT)</b> <i>Carlos Anaya Eredias, María Elena Anaya Pérez, Martín Francisco León Martínez.....</i>	<b>252-267</b>
<b>ESTUDIO DE OCUPACIÓN ESPECTRAL DE SERVICIOS DE COMUNICACIÓN DE 85 MHZ A 2.5 GHZ EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO (SPECTRUM OCCUPANCY MEASUREMENTS ON COMMUNICATION SERVICES FROM 85 MHZ TO 2.5 GHZ IN SAN LUIS POTOSI, MEXICO)</b> <i>David Antonio Arista Ramírez, Marco Aurelio Cárdenas Juárez, Ulises Pineda Rico, Armando Arce Casas, Enrique Stevens Navarro.....</i>	<b>268-282</b>
<b>USO DE APLICACIONES DE LA WEB 2.0 PARA LA EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO (USE OF WEB 2.0 APPLICATIONS FOR THE EVALUATION OF SIGNIFICANT LEARNING)</b> <i>Oralia Arriaga Nabor, María Palmira González Villegas, Alma Cristina Ramírez Covarrubias, Adalberto Iriarte Solís, Luis Anibal López Arciniega, Agustín Leopoldo Arciniega Luna.....</i>	<b>283-301</b>
<b>MITIGACIÓN DE TORMENTA DE BROADCAST EN LA TRANSMISIÓN DE MENSAJES DE EMERGENCIA USANDO COMPARTICIÓN DE ESPECTRO EN VANETS DE RADIO COGNOSCITIVO (BROADCAST STORM MITIGATION IN EMERGENCY MESSAGES TRANSMISSION USING SPECTRUM SHARING IN COGNITIVE RADIO VANETS)</b> <i>José Ulises Avalos Gómez, Ulises Pineda Rico, Marco Aurelio Cárdenas Juárez, Armando Arce Casas, Enrique Stevens Navarro.....</i>	<b>302-317</b>
<b>IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE COMPUERTAS DIGITALES CON DISPOSITIVO MÓVIL Y REALIDAD AUMENTADA (AUTOMATIC IDENTIFICATION OF DIGITAL GATES THROUGH MOBILE DEVICE AND AUGMENTED REALITY)</b> <i>Carlos Avilés Cruz, Juan Villegas Cortez, Arturo Zúñiga López, Eduardo Rodríguez Martínez, Andrés Ferreyra Ramírez.....</i>	<b>318-329</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y REGISTRO DE DATOS CON RELOJ DE TIEMPO REAL Y ALMACENAMIENTO EN TARJETA MICROSD (IMPLEMENTATION OF A DATALOGGER SYSTEM WITH REAL-TIME CLOCK AND STORAGE IN A MICROSD CARD)</b> <i>Miguel Ángel Bañuelos Saucedo.....</i>	<b>330-346</b>
<b>SOFTWARE DE ADMINISTRACIÓN DE CONTENIDOS DE APRENDIZAJE PERSONALIZADO PARA UN AMBIENTE UNIVERSITARIO (LEARNING CONTENT MANAGEMENT SOFTWARE PERSONALIZED FOR A UNIVERSITY ENVIRONMENT)</b> <i>Aldonso Becerra Sánchez, Gustavo Zepeda Valles, Alexandro Iván Pérez García, Uriel Ramírez-García Correa, Santiago Esparza Guerrero.....</i>	<b>347-362</b>
<b>ESTIMACION DE RADIOENLACE PUNTO A PUNTO DE UN MINI VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (POINT TO POINT RADIO LINK ESTIMATION OF A MINI UNMANNED AERIAL VEHICLE)</b> <i>Andrés Calvillo Téllez, José Cruz Núñez Pérez, Antonio Gómez Roa, J. R. Cárdenas Valdez.....</i>	<b>363-376</b>

**FILTRO DIGITAL DE LOS COEFICIENTES ACÚSTICOS EN MATERIALES SÓLIDOS EN UN TUBO DE IMPEDANCIA CON DOS CÁMARAS ACÚSTICAS (DIGITAL FILTER OF ACOUSTIC COEFFICIENTS IN SOLID MATERIALS IN AN IMPEDANCE TUBE WITH TWO ACOUSTIC CHAMBERS)**

*Rosnelly Cruz Cecilio, Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón, Laura Angélica Lancón Rivera.....377-392*

**ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD (ANALYSIS AND CONSTRUCTION OF A THREE DEGREE OF FREEDOM PARALLEL DELTA ROBOT)**

*Braulio José Cruz Jiménez, Ricardo Javier Peón Escalante, José Iván Prado Costoyas, Luis Josué Ricalde Castellanos.....393-410*

**SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EXTENDER EL TIEMPO DE OPERACIÓN DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA (PHOTOVOLTAIC SYSTEM TO EXTEND THE OPERATION TIME OF AN UNMANNED AIRCRAFT)**

*Israel De Santiago Talavera, Abimael Jiménez Pérez, Geovani E. García, Ángel Saucedo Carvajal.....411-426*

**MICRÓFONO VOCAL CON RESPUESTA EN FRECUENCIA ADAPTABLE (VOCAL MICROPHONE WITH ADAPTABLE FREQUENCY RESPONSE)**

*René Erik Estrada Chávez, Carlos Avilés Cruz, Juan Villegas Cortez, Arturo Zúñiga López.....427-444*

**IMPACTO DEL DESEQUILIBRIO DE CLASES EN EL ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES EN PROBLEMAS MULTI-CLASE (IMPACT OF CLASS IMBALANCE IN THE TRAINING OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR MULTI-CLASS PROBLEMS)**

*Andrés Ferreyra Ramírez, Eduardo Rodríguez Martínez.....445-460*

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR BLDC POR MEDIO DE UN CONTROLADOR DE HISTÉRESIS POR CORRIENTE (MODELING AND SIMULATION OF A SPEED CONTROLLER FOR A BLDC MOTOR, USING A HYSTERESIS CURRENT CONTROLLER)**

*Jorge Luis Flores Mejía, José H. Arroyo Núñez, Iván de Jesús Rivas Cambero, Héctor García Maldonado..... 461-477*

**ENCRIPCIÓN DE IMÁGENES EN ESCALA DE GRISES CON LLAVES CAÓTICAS (BLACK AND WHITE IMAGE ENCRYPTION WITH CHAOTIC KEYS)**

*Héctor Garcés Guzmán, Víctor Manuel Hinostroza Zubia, Priscila Betsabe Hernández Valdez..... 478-489*

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE RADIO COGNITIVO CON DIFERENTES DISTRIBUCIONES DEL TIEMPO DE SERVICIO DE LOS USUARIOS SECUNDARIOS (EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF COGNITIVE RADIO SYSTEMS WITH DIFFERENT DISTRIBUTIONS OF THE SERVICE TIME OF SECONDARY USERS)**

*Diego García Olivares, Genaro Hernández Valdez, Sandra Lirio Castellanos López, Felipe Alejandro Cruz Pérez, Grethell Georgina Pérez Sánchez..... 490-507*

**APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL PARA LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE TUIITS EN ESPAÑOL (ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLICATION FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF TWEETS IN SPANISH)**

*Andrea Gidalti García Pérez, Ana Bertha Ríos Alvarado, Edgar Tello Leal, José Hugo Barrón Zambrano, Alan Díaz Manríquez.....508-524*

**COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR TIPO SECO DE 5 kVA ANTE CARGA LINEAL Y NO LINEAL (COMPARISON OF LOSSES IN A 5 kVA DRY-TYPE TRANSFORMER WITH A LINEAR AND NON-LINEAR LOAD)**

*Israel González Pérez, José Antonio Álvarez Salas, Juan Segundo Ramírez..... 525-539*

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL DE UN TALADRO UTILIZANDO VENSIM PLE (ANALYSIS OF SCENARIOS FOR THE INDUSTRIAL MAINTENANCE OF A DRILL USING VENSIM PLE)**

*Jesús Vicente González Sosa, Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado, Jesús Loyo Quijada, Mariana Hernández González, Miguel Ángel López Ontiveros..... 540-557*

**MICROACELERÓMETRO MEMS, DISEÑO, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ELECTROSTÁTICO (MEMS MICROACCELEROMETER, DESIGN, STRUCTURAL AND ELECTROSTATIC ANALYSIS)**

*José Luis González Vidal, Daniel Hernández Moedano, Francisco Morales Jiménez, Juan José Raygoza Panduro..... 558-572*

**IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CIFRADO TRIVIUM EN UN SISTEMA EMBEBIDO (AN IMPLEMENTATION OF THE TRIVIUM ENCRYPTION ALGORITHM IN AN EMBEDDED SYSTEM)**

*Ishai Gun Roffe, Oscar Alvarado-Nava, Eduardo Rodríguez Martínez, Andrés Ferreyra Ramírez..... 573-587*

**MEDIDAS DE SIMILITUD BASADAS EN CARACTERÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE RELACIONES TAXONÓMICAS (SIMILARITY MEASURES BASED ON FEATURES FOR THE EVALUATION OF TAXONOMIC RELATIONSHIPS)**

*Aimee Cecilia Hernández García, Mireya Tovar Vidal, José de Jesús Lavalle Martínez, Ana Patricia Cervantes Márquez..... 588-605*

**SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL RECUBRIMIENTO DE TUBERÍAS SUBTERRÁNEAS CON BASE EN UN ROBOT MÓVIL Y BAJO LA PERSPECTIVA DEL INTERNET DE LAS COSAS (SYSTEM FOR THE DETECTION OF FAULTS IN THE COATING OF UNDERGROUND PIPELINES BASED ON A MOBILE ROBOT AND UNDER THE PERSPECTIVE OF THE INTERNET OF THINGS)**

*Enrique Gerardo Hernández Vega, Luis Guillermo Floriano Gavaldón, Wendy Arlet Portillo González, Francisco Javier Álvarez Prieto, Jesús Alonso Reyes Porras..... 606-624*

**EVALUACIÓN DE FIREWALLS BASADOS EN SOFTWARE LIBRE (FIREWALL EVALUATION BASED ON OPEN SOURCE SOFTWARE)**

*Adalberto Iriarte Solís, Pablo Velarde Alvarado, Arturo Aguirre Villaseñor, Luis Javier Mena Camaré, Rafael Martínez Peláez, Alberto Manuel Ochoa Brust..... 625-637*

**AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN (AUTOMATED TEST BENCH TO EXTRACT THE PARAMETERS OF AN INDUCTION MOTOR)**

*Cristian Emmanuel Jacobo Ruiz, Fernando Alberto Peralta León, Marco Antonio Rodríguez Blanco, Iván Duran, José Luis Vázquez Ávila..... 638-655*

**INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA Y A LAS REDES NEURONALES CON LOS VEHÍCULOS DE BRAITENBERG (INTRODUCTION TO ROBOTICS AND NEURAL NETWORKS WITH BRAITENBERG VEHICLES)**

*Joel Ricardo Jiménez Cruz..... 656-674*

**ARQUITECTURA DE CONTROL CONDUCTUAL PARA AGENTES INTELIGENTES (ARCHITECTURE OF BEHAVIORAL CONTROL FOR INTELLIGENT AGENTS)**

*Joel Ricardo Jiménez Cruz..... 675-694*

**ANÁLISIS DE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LA INTEGRAL DEFINIDA POR MEDIO DE LA TEORÍA APOE (ANALYSIS OF THE CONCEPTUALIZATION OF THE INTEGRAL DEFINED THROUGH THE APOE THEORY)**

*Martha Patricia Jiménez Villanueva, Elena Fabiola Ruiz Ledesma, Ángel Salvador Montiel Sánchez..... 695-711*

**CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO UTILIZANDO INTERPOLACIÓN LINEAL PARA AUTONIVELAR LA SUPERFICIE DE TRABAJO EN UNA CNC (COMPUTERIZED NUMERICAL CONTROL USING LINEAR INTERPOLATION TO SELF-LEVEL THE WORKING SURFACE IN A CNC)**

*Miguel Antonio Lazaro Santiago, David Inocente Santiago Casanova, José Luis Vázquez Avila, Walter Ariel Silva Martínez, Marco Antonio Rodríguez Blanco, Horacio Alvarado Vigil, Homero Toral Cruz..... 712-726*

**GENERADOR DE PROBLEMAS E INTEGRADOR DE BATERÍAS DE EXÁMENES PARA EL CURSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA (PROBLEM GENERATOR AND BATTERY INTEGRATOR OF EXAMS FOR THE COURSE OF NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING)**

*Hugo Pablo Leyva, Rafoela Blanca Silva López..... 727-740*

**SISTEMA PARA GEOLOCALIZAR Y REPORTAR INCIDENTES RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DE USUARIOS EN UN CAMPUS UNIVERSITARIO (A SYSTEM FOR GEO-LOCALIZE AND REPORT USER SECURITY-RELATED EVENTS IN UNIVERSITY CAMPUS)**

*Rodrigo Lino Osorio, José A. Reyes-Ortiz, Leonardo Sánchez..... 741-755*

**MODELO PARA EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PRODUCIDA EN UNA PLANTA DE ÓSMOSIS RETARDADA POR PRESIÓN (MODEL FOR EVALUATING THE ELECTRIC POWER OUTPUT OF PRESSURE RETARDED OSMOSIS GENERATION PLANT)**

*Mario Llamas Rivas, Alejandro Pizano Martínez, Iván Abel Hernández Robles, Miguel Ángel Gómez Martínez, Adrián González Parada, Héctor Javier Estrada García..... 756-771*

**APLICABILIDAD DE LA MANUFACTURA ESBELTA EN PROBLEMAS DE PRODUCCIÓN: EL CASO DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UAM-AZC (APPLICABILITY OF LEAN MANUFACTURING IN PRODUCTION PROBLEMS: A CASE STUDY OF INDUSTRIAL ENGINEERING DEGREE IN THE UAM-AZC)**

*Miguel Ángel López Ontiveros, Mariana Hernández González, Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado, Jesús Loyo Quijada, Jesús Vicente González Sosa..... 772-786*

**ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DEL DISCURSO POLÍTICO EN TWITTER DE LOS CANDIDATOS A LA PRESIDENCIA DE MÉXICO (ANALYSIS AND VISUALIZATION OF THE POLITICAL DISCOURSE IN TWITTER OF THE CANDIDATES TO THE PRESIDENCY OF MEXICO)**

*Erick López Ornelas, Rocío Abascal Mena..... 787-803*

**PROTOTIPO FUNCIONAL PARA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES CON SALIDA DE AUDIO EN UN SISTEMA EMBEBIDO CON RED NEURONAL CONVOLUCIONAL (FUNCTIONAL PROTOTYPE FOR CLASSIFICATION OF IMAGES WITH AUDIO OUTPUT IN AN EMBEDDED SYSTEM USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK)**

*Fidel López Saca, Andrés Ferreyra Ramírez, Carlos Avilés Cruz..... 804-821*

**AUTOMATIZACIÓN DE LA ETAPA DE CORTE DE UNA EXTRUSORA DE PLÁSTICO TERMOFIJO (AUTOMATION OF THE CUTTING STAGE OF A TERMOFIJO PLASTIC EXTRUDER)**

*Miguel Magos Rivera, Jose Antonio Lara Chavez, Juan F. Cuevas Olivares..... 822-838*

**ANÁLISIS DE COBERTURA Y CAPACIDAD DE USUARIOS EN RED CELULAR GSM PARA SITUACIONES DE EMERGENCIA (ANALYSIS OF COVERAGE AND CAPACITY OF USERS IN GSM CELLULAR NETWORK FOR EMERGENCY SITUATIONS)**

*Dulce Mayra Janet Martínez García, Hugo Andrés Pérez Guerrero, Marco Aurelio Cárdenas Juárez, Ulises Pineda Rico, Enrique Stevens Navarro, Jorge Simón Rodríguez..... 839-857*

**OBSERVADOR HÍBRIDO DE MODOS DESLIZANTES PARA EL CONTROL SENSORLESS DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES (HYBRID SLIDING MODE OBSERVER FOR SENSORLESS CONTROL OF A PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR)**

*Daniel Memije Garduño, Oscar Carranza Castillo, Jaime José Rodríguez Rivas, Rubén Ortega González..... 858-876*

**ETIQUETADOR COLABORATIVO BASADO EN WEB PARA ENTIDADES NOMBRADAS EN LA TAREA DE EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN (COLLABORATIVE WEB-BASED TAGGER FOR NAMED ENTITIES IN THE TASK OF INFORMATION EXTRACTION)**

*David Efraín Muñoz Morales, Fernando Pérez Téllez, David Eduardo Pinto Avendaño..... 877-893*

**ANÁLISIS DEL VECTOR DE PARK PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA (PARK'S VECTOR ANALYSIS FOR ELECTRICAL FAULT DETECTION IN STATOR OF LOW POWER WIND TURBINE)**

*Raúl Arturo Ortiz Medina, Francisco Javier Villalobos Piña, Victor Arturo Maldonado Ruelas, Ricardo Álvarez Salas..... 894-909*

**DESARROLLO DE UN BANCO DE SUPERCAPACITORES CON RED DE BALANCEO Y COMUNICACIÓN CAN (DEVELOPMENT OF A SUPERCAPACITORS BANK WITH BALANCING NETWORK AND CAN BUS COMMUNICATION)**

*Edgar Peralta Sánchez, Manuel Tlapa Juárez, Gerardo Mino Aguilar, Beatriz Eugenia Graniel García, Félix Quirino Morales..... 910-928*

**IMPLEMENTACIÓN DE RED CELULAR DE BAJO COSTO PARA COMUNIDADES RURALES BASADA EN SDR Y OPENBTS (IMPLEMENTATION OF A LOW COST CELLULAR NETWORK FOR RURAL COMMUNITIES BASED ON SDR AND OPENBTS)**

*Hugo Andrés Pérez Guerrero, Dulce Mayra Janet Martínez García, Marco Aurelio Cárdenas Juárez, Ulises Pineda Rico, Enrique Stevens Navarro, Armando Arce Casas..... 929-945*

**ANÁLISIS DE LA POLARIDAD EN COMENTARIOS DE ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS SOBRE EL DESEMPEÑO DE SUS PROFESORES (POLARITY ANALYSIS OF UNIVERSITY STUDENT COMMENTS ABOUT THEIR PROFESSORS PROFESSIONAL PERFORMANCE)**

*Angeles Belém Priego Sánchez, David Eduardo Pinto Avendaño, Mauricio Castro Cardona, Martha Patricia León Arenas..... 946-961*

**MODELO BASADO EN REDES NEURONALES RECURRENTE LSTM PARA LA PREDICCIÓN DE LA SIGUIENTE ACTIVIDAD EN PROCESOS DE NEGOCIO (LSTM RECURRENT NEURAL NETWORK BASED-MODEL FOR THE PREDICTION OF THE NEXT ACTIVITY IN BUSINESS PROCESSES)**

*Ulises Manuel Ramírez Alcocer, Edgar Tello Leal, Ana Bertha Ríos Alvarado..... 962-974*

**CONTROLADOR DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN BUS DE CD DE UN CONVERTIDOR BACK-TO-BACK POR EL LADO DE LA RED PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA (VOLTAGE AND CURRENT ON THE GRID SIDE FOR THE DC BUS OF A BACK TO BACK CONVERTER FOR A WIND GENERATION SYSTEM)**

*Francisco Emilio Rodarte Gutiérrez, Jaime José Rodríguez Rivas, Oscar Carranza Castillo, Rubén Ortega González..... 975-991*

**MODELO DE CÁLCULO DE IRRADIANCIA CONSIDERANDO SOMBREADO PARA CAMPOS DE COLECTORES SOLARES (MODEL OF IRRADIANCE CALCULATION CONSIDERING SHADING FOR SOLAR COLECTOR FIELDS)**

*Santiago Sánchez Carbajal, Pedro Manuel Rodrigo Cruz..... 992-1008*

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN VHDL DE UN SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN MEDIANTE FPGA y PPS PARA REFERENCIA DE 1 ms (DESIGN AND IMPLEMENTATION IN VHDL OF A SYNCHRONIZATION SYSTEM USING FPGA AND PPS FOR A 1 ms REFERENCE)**

*Sánchez Magaña María Amparo, Luis Morales Velázquez..... 1009-1026*

**TITANIUM FRAMEWORK PARA AUTOMATIZACIÓN DE PRUEBAS DE SOFTWARE (TITANIUM FRAMEWORK FOR SOFTWARE TESTING AUTOMATION)**

*Gilberto Sánchez Mares..... 1027-1043*



<b>SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN LÍNEA PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS MÓVILES (ONLINE MONITORING SYSTEM FOR MOBILE WIRELESS SENSORS NETWORKS)</b> <i>Leonardo Daniel Sánchez Martínez, Carlos Ernesto Carrillo Arellano, Carolina Salinas García.....</i>	<b>1044-1055</b>
<b>ESQUEMA PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS, EN UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN INTERNA (SCHEME FOR DETECTION AND LOCALIZATION OF FAILURES, IN AN INTERNAL COMBUSTION SYSTEM)</b> <i>Airam Monserrat Sánchez Villalobos, Elvia Ruiz Beltrán, Jorge Octavio Valdés Valadez, Jorge Luis Orozco Mora.....</i>	<b>1056-1075</b>
<b>APLICACIÓN MÓVIL PARA EL APOYO EN EL ESTUDIO ANATÓMICO DEL ROSTRO CON REALIDAD AUMENTADA (MOBILE APPLICATION FOR SUPPORTING THE ANATOMIC STUDY OF THE FACE WITH AUGMENTED REALITY)</b> <i>Leonardo Sánchez, José A. Reyes Ortiz, Alan Garza Ángeles.....</i>	<b>1076-1093</b>
<b>TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE TEXTO MEDIANTE LUZ VISIBLE DE LEDS Y SENSOR DE LUZ (TRANSMISSION AND RECEPTION OF TEXT USING VISIBLE LIGHT AND A LIGHT SENSOR)</b> <i>Sergio Sandoval Reyes.....</i>	<b>1094-1106</b>
<b>SISTEMA PARA EL ACCESO A SERVICIOS EN ÁREAS UBICUAS ORIENTADO A PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ (SYSTEM FOR ACCESS TO SERVICES IN AREAS UBIQUITOUS ORIENTED PEOPLE WITH DISABILITIES MOTRIZ)</b> <i>José Luis Santiago López, Alejandro Jarillo Silva, Víctor Alberto Gómez Pérez, Irving Ulises Hernández Miguel.....</i>	<b>1107-1124</b>
<b>ANALIZADOR DE ESPECTRO CON FUNCIÓN DE MONITOREO REMOTO MEDIANTE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE (SPECTRUM ANALYZER WITH REMOTE MONITORING FUNCTION BY SOFTWARE DEFINED RADIO)</b> <i>Ismael Santiago Rivera, Sergio Vidal Beltran, Fernando Martínez Piñón.....</i>	<b>1125-1140</b>
<b>DISEÑO EN VHDL DE UNA INTERFAZ DE DATOS SERIE- DAC PARA UN CONTROL BARRA-ESFERA (VHDL DESIGN OF A SERIAL-DAC DATA INTERFACE FOR A BALL AND BEAM CONTROL)</b> <i>Juan Sifuentes Mijares, Jean Philipe Andre Paistel Sanchez, Daniel Flores Montes.....</i>	<b>1141-1153</b>
<b>SOFTWARE DE SIMULACIÓN CENTRADO EN EL APRENDIZAJE DE LAS CONDICIONES DE EQUILIBRIO (SIMULATION SOFTWARE FOCUSED ON THE LEARNING OF EQUILIBRIUM CONDITIONS)</b> <i>Javier Silvestre Zavala, Juan Manuel Banda Chávez.....</i>	<b>1154-1170</b>
<b>SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA SILLA/EXOESQUELETO (SIMULATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A CHAIR/EXOSKELETON)</b> <i>Luis I. Solórzano Caballero Amparo D. Palomino Merino Fernando Reyes Cortés César Martínez Torres, Rogelio Pérez Santiago, Gibran Etcheverry.....</i>	<b>1171-1190</b>
<b>DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS A LAZO ABIERTO PARA MOTORES BLDC (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN OPEN-LOOP TEST-BED FOR BLDC MOTORS)</b> <i>Lesslie Arantxa Sosa González, Victor Arturo Maldonado Ruelas.....</i>	<b>1191-1207</b>
<b>PROTOTIPO DE APOYO PARA EMULAR EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOCOLO MESI (PROTOTYPE OF SUPPORT FOR EMULATING MESI PROTOCOL OPERATION)</b> <i>Rodrigo Vázquez López, Esther Viridiana Vázquez Carmona, Juan Carlos Herrera Lozada, Miguel Hernández Bolaños, Magdalena Marciano Melchor.....</i>	<b>1208-1221</b>
<b>VIDEO PORTERO USANDO TARJETAS RASPBERRY PI 3 (VIDEO INTERCOM USING RASPBERRY PI 3 CARDS)</b> <i>José Ignacio Vega Luna, Gerardo Salgado Guzmán, Mario Alberto Lagos Acosta, Francisco Javier Sánchez Rangel, José Francisco Cosme Aceves.....</i>	<b>1222-1241</b>
<b>ACCESO A UN CENTRO DE DATOS UTILIZANDO UNA TARJETA RFID Y HUELLA DIGITAL (ACCESS TO A DATA CENTER USING A RFID CARD AND THE FINGERPRINT)</b> <i>José Ignacio Vega Luna, Mario Alberto Lagos Acosta, Francisco Javier Sánchez Rangel, José Francisco Cosme Aceves.....</i>	<b>1242-1258</b>
<b>DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED CON TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO Y REDES NEURONALES (DESIGN OF GRID TIED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH SOLID STATE TRANSFORMER AND NEURAL NETWORKS)</b> <i>César Enrique Xool Ramírez, Luis Josué Ricalde Castellanos, Braulio José Cruz Jiménez, Ricardo Javier Peón Escalante, Alejandro Arturo Castillo Atoche.....</i>	<b>1259-1274</b>

<b>PRESENTACIÓN CISMé 2018</b> .....	<b>1275</b>
<b>MECANISMO DE 4 BARRAS COMO PROTOTIPO DIDÁCTICO PARA EL ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES MECÁNICAS PRODUCIDAS POR LAS FUERZAS Y MOMENTOS DE SACUDIMIENTO</b> (FOUR-BAR MECHANISM AS A DIDACTIC PROTOTYPE FOR THE ANALYSIS OF MECHANICAL VIBRATIONS PRODUCED BY SHAKING FORCES AND MOMENTS) <i>Armando Abitia Padilla, Pedro Zatarain Bernal, Armando Ontiveros Acosta, Viera Ortiz Ulises Ismael, Samuel Angulo Moreno</i> .....	<b>1276-1290</b>
<b>SISTEMA DE TRES EJES COORDENADOS PARA AUTOMATIZAR EL PROCESO DE ROCIADO TÉRMICO EN FLAMA, 1ER ETAPA</b> (THREE-AXIS SYSTEM TO AUTOMATE THE 1ST STAGE OF THERMAL FLAMES SPRAY) <i>Luis E. Alanís Carranza, Moisés V. Márquez Olivera, Ricardo Cuenca Álvarez, Octavio Sánchez García, Viridiana G. Hernández Herrera</i> .....	<b>1291-1303</b>
<b>DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO DE ENSAYOS MINIATURA DE PUNZONAMIENTO PARA DETERMINAR PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACERO DE BAJA ALEACIÓN AL CROMO-NÍQUEL DEL ANCLAJE DE UN PUENTE</b> (PUNCHING SHEAR MINIATURE TESTING DEVICE TO DETERMINE THE MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CHROME-NICKEL STEEL OF A BRIDGE ANCHOR) <i>Luis Alejandro Alcaraz Caracheo, Erik López Vargas, Elías Daniel Valadez González, Gilberto Ruiz Mondragón</i> .....	<b>1304-1317</b>
<b>OBTENCIÓN DE CURVAS <math>\epsilon</math>-T DE ALUMINIO PLEGADO MEDIANTE UN SISTEMA BARRA DE HOPKINSON</b> (OBTAINING CURVES $\epsilon$ -T OF FOLDED ALUMINUM BY MEANS OF A HOPKINSON BAR SYSTEM) <i>Luis Alejandro Alcaraz Caracheo, Horacio Orozco Mendoza, Efrén Arriaga González</i> .....	<b>1318-1328</b>
<b>DISEÑO DE UN SISTEMA DE SUJECIÓN PARA SISTEMATIZAR EL CORTE POR ASERRADO DE PIEZAS METÁLICAS TRATADAS TÉRMICAMENTE</b> (DESIGN OF A FIXTURE DEVICE FOR SYSTEMATIZING THE SAW CUT OF HEAT TREATED METALLIC PARTS) <i>Alfaro Méndez Jonathan, Álvaro Sánchez Rodríguez, Carlos Rafael Aguilar Nájera, Luciano Pérez González, Santos Murillo Luna</i> .....	<b>1329-1340</b>
<b>SIMULACIÓN DE LOS CANALES DE FLUJO PARA UNA CELDA TIPO PEM INSPIRADO EN LA NATURALEZA</b> (SIMULATION OF THE FLOW-FIELD CHANNELS INSPIRED IN THE NATURE FOR A PEM FUEL CELL) <i>Edwin Alonso Monje, Beatriz E. Graniel García</i> .....	<b>1341-1352</b>
<b>DISEÑO DE UN CONTROL ÓPTIMO PARA REGULAR LA CONCENTRACIÓN DE CO<sub>2</sub> AL INTERIOR DE UN INVERNADERO</b> (OPTIMAL CONTROL DESIGN TO REGULATE THE CONCENTRATION OF CO <sub>2</sub> INSIDE A GREENHOUSE) <i>Edwin Alonso Monje, J. M. Gutiérrez Arias, I. López Cruz</i> .....	<b>1353-1363</b>
<b>DISEÑO DE ESTRUCTURAS CELULARES BASE ACERO INOXIDABLE CON PROPIEDADES SIMILARES A LAS DEL HUESO HUMANO</b> (CELLULAR STRUCTURE DESIGN BASE STAINLESS STEEL WITH SIMILAR PROPERTIES LIKE THE HUMAN BONE) <i>Carlos Iván Alvarado Tovar, Jorge Corona Castuera, Carlos A. Poblano Salas, Álvaro Sánchez Rodríguez</i> .....	<b>1364-1377</b>
<b>VENTAJAS COMPETITIVAS EN LA INTEGRACIÓN DE SUBSISTEMAS PARA LA REALIZACIÓN DE PROYECTOS DE FIN DE CARRERA EN INGENIERÍA MECATRÓNICA</b> (COMPETITIVE ADVANTAGES IN THE INTEGRATION OF SUBSYSTEMS FOR THE REALIZATION OF END-GRADE PROJECTS IN MECHATRONICS ENGINEERING) <i>José Antonio Aquino Robles, Cecilia Fernández N., Leonel G. Corona R.</i> .....	<b>1378-1387</b>
<b>CONVERTIDOR BIFÁSICO A TRIFÁSICO PARA EL ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN</b> (TWO TO THREE PHASE CONVERTER FOR INDUCTION MOTORS) <i>José Antonio Aquino Robles, Cecilia Fernández N., Leonel G. Corona R.</i> .....	<b>1388-1400</b>
<b>COORDINACIÓN DE DOS DRONES MEDIANTE UN SENSOR DE ALTITUD/ORIENTACIÓN MONOCULAR</b> (COORDINATION OF TWO DRONES THROUGH AN ALTITUDE/ORIENTATION MONOCULAR SENSOR) <i>Nelson Edgardo Arias Méndez, Jonatan Uziel Alvarez Muñoz, Juan Antonio Escareño Castro, Amparo Dora Palomino Merino, María Aurora Diozcora Vargas Treviño</i> .....	<b>1401-1413</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BRAZO ERGONÓMICO PARA ESTACIONES ENSAMBLADORAS DE INDUSTRIA MANUFACTURERA</b> (DESIGN AND CONSTRUCTION OF ERGONOMIC ARM FOR ASSEMBLY STATIONS OF MANUFACTURING INDUSTRY) <i>Miguel Ángel Banda Gamboa, Salvador Jiménez, Andrés Gámez Bocanegra, Citlalin Aurelia Ortiz Hermosillo</i> .....	<b>1414-1420</b>

**DISEÑO DE SISTEMAS MECATRÓNICOS: PROTOTIPOS VIRTUALES (DESIGN OF MECHATRONIC SYSTEMS: VIRTUAL PROTOTYPES)**

*Andrés Blanco Ortega, Andrea Magadán Salazar, Fabio A. Gómez Becerra, Cesar H. Guzmán Valdivia, Edgar Antúnez Leyva..... 1421-1439*

**CONTROL NEURONAL Y MONITOREO REMOTO DE LA VARIABLE HUMEDAD EN UN INVERNADERO (NEURONAL CONTROL AND REMOTE MONITORING OF HUMIDITY VARIABLE IN A GREENHOUSE)**

*Luis Jesús Cárdenas Peregrino, José de Jesús García Cortes, Edgar David Guzmán Martínez, César Nicolás Bravo Díaz..... 1440-1454*

**SISTEMA DE SEGURIDAD PARA CONTROL DE ACCESO Y MONITOREO DE PRESENCIA A TRAVÉS DE UNA CENTRAL DE DATOS (SECURITY SYSTEM FOR ACCESS CONTROL AND PRESENCE MONITORING THROUGH A DATA CENTRAL)**

*D. Cárdenas, D. Campos, A. Salinas, M. Martínez, E. Rivas..... 1455-1465*

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROUTER CNC (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A CNC ROUTER)**

*Jorge Castillo Ortega, Sergio Isaí Acosta Fonseca, Eric García Alarcón, Alejandro Gil Vázquez, Violeta Martínez Ramírez..... 1466-1499*

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROUTER CNC (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A CNC ROUTER)**

*Jorge Castillo Ortega, Sergio Isaí Acosta Fonseca, Eric García Alarcón, Alejandro Gil Vázquez, Violeta Martínez Ramírez..... 1500-1511*

**SISTEMA MULTIMEDIA QUE SIMULA ALGORITMOS DE CRIPTOGRAFÍA (MULTIMEDIA SYSTEM THAT SIMULATES CRYPTOGRAPHY ALGORITHMS)**

*Meliza Contreras González, Ana Patricia Cervantes Márquez, Claudia Zepeda Cortés, Yolanda Moyao Martínez, Beatriz Beltrán Martínez, Rafael Gallardo García..... 1512-1526*

**DISEÑO DE UNA APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DIFERENCIALES CON EL APOYO DEL SOFTWARE GEOGEBRA (DESIGN OF AN APPLICATION OF THE DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH THE SUPPORT OF THE GEOGEBRA SOFTWARE)**

*Ma. del Carmen Cornejo Serrano, Eloísa Bernardett Villalobos Oliver, Pedro Alberto Quintana Hernández, José Alfredo Ramos Beltrán, Santiago Molina Reséndiz..... 1527-1537*

**PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR RPLIDAR A2 M8 USANDO LINUX Y PYTHON (SET UP OF RPLIDAR A2 M8 SENSOR USING LINUX AND PYTHON)**

*Pedro Correa, Alejandro Barranco, Francisco Pérez, Pedro Bautista, Horacio Rostro..... 1538-1546*

**CONTROL DE TORQUE PARA SERVOMOTORES SIN ESCOBILLAS (TORQUE CONTROL FOR BRUSHLESS SERVOMOTOR)**

*Agustín Cruz Contreras, José Jerónimo Sarmiento, Gerardo A. Martínez Fernández, Viridiana G. Hernández Herrera..... 1547-1566*

**IMPLEMENTACIÓN Y CO-SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR PID EN TIEMPO REAL CON FPGA DE BAJO COSTO Y CÓDIGO LIBRE (IMPLEMENTATION AND CO-SIMULATION OF PID CONTROLLER RT BASED ON FPGA OF LOW COST AND OPEN SOURCE)**

*Edson Cruz Miguel, Juvenal Rodríguez Reséndiz, Carlos A. González Gutiérrez..... 1567-1581*

**DISPOSITIVO MEDIDOR DE FUERZA DE AGARRE DE LOS DÍGITOS DE LA MANO HUMANA CON RETORNO POR TRANSDUCCIÓN ACÚSTICA (GRIP STRENGTH MEASURER DEVICE OF THE DIGITS OF THE HUMAN HAND WITH FEEDBACK BY ACOUSTIC TRANSDUCTION)**

*Itzayana Duarte Rabelo, Eduardo Morales Sánchez..... 1582-1592*

**PROCESAMIENTO DE IMÁGENES PARA USO EN MÁQUINA DE CORTE Y GRABADO LÁSER USANDO LABVIEW (IMAGE PROCESSING FOR USE IN CUTTING MACHINE AND LASER ENGRAVING USING LABVIEW)**

*Leonel Estrada Rojo, Carlos Alberto Fuentes Hernández, Julio Ortega Alejos, Susana Violeta Martínez Hernández, Jeziel Vázquez Nava..... 1593-1603*

**DISEÑO MECÁNICO DE UNA MÁQUINA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD PARA LA FABRICACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS (MECHANICAL DESIGN OF A THREE DEGREES OF FREEDOM MACHINE FOR PRINTED CIRCUITS BOARD MANUFACTURE)**

*Rogelio N. Fuentes Ortega, Viridiana G. Hernández Herrera, Octavio Sánchez García, Moisés V. Márquez Olivera, Héctor A. Flores Ávalos, Laura G. Marujo García..... 1604-1619*

**ROBOT DE DOS GRADOS DE LIBERTAR COMO UNA PLATAFORMA EDUCATIVA PARA ROBÓTICA (A 2-DOF ROBOT AS AN EDUCATIONAL PLATFORM FOR ROBOTICS)**

*Diana G. Gámez Alvarado, Ivonne J. Rico Rodríguez, Mauro Santoyo Mora, Juan José Martínez Nolasco..... 1620-1628*

**MODELADO, CONTROL Y MONITOREO VIA INTERNET DE LA VARIABLE PRESION DE AIRE (MODELING, CONTROL AND MONITORING BY INTERNET OF AIR PRESSURE VARIABLE)**

*José de Jesús García Cortés, Luis Francisco García Segura, Gustavo Chávez Orendain, Edgar David Guzmán Martínez, Luis Jesús Cárdenas Peregrino..... 1629-1644*

**CONTROL NEURONAL, Y MONITOREO REMOTO DE LA VARIABLE TEMPERATURA EN UN INVERNADERO (NEURONAL CONTROL, AND REMOTE MONITORING OF THE VARIABLE TEMPERATURE IN A GREENHOUSE)**

*José de Jesús García Cortés, Edgar David Guzmán Martínez, Luis Jesús Cárdenas Peregrino, Jorge Luis Sánchez Serrano..... 1645-1652*

**CARACTERIZACIÓN DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD REFORZADO CON FIBRAS DE AGAVE POR DRX Y ENSAYOS DE TRACCIÓN (CHARACTERIZATION OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE REINFORCED WITH AGAVE FIBERS BY XRD AND TENSILE TESTS)**

*Raúl Ramón García Herrera, Diego Camacho Arzate, Isidro Montes Zavala, Francisco Javier Cervantes Vallejo, Luis Alejandro Alcaraz Caracheo, Carolina Hernández Navarro..... 1653-1661*

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BRAZO ERGONÓMICO PARA ESTACIONES ENSAMBLADORAS DE INDUSTRIA MANUFACTURERA (DESIGN AND CONSTRUCTION OF ERGONOMIC ARM FOR ASSEMBLY STATIONS OF MANUFACTURING INDUSTRY)**

*Miguel Ángel Banda Gamboa, Salvador Jiménez, Andrés Gámez Bocanegra, Citlalin Aurelia Ortiz Hermosillo..... 1662-1674*

**REVISIÓN DE PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA ALCALINA (REVIEW OF PARAMETERS FOR THE DESIGN OF AN ALKALINE ELECTROLYTIC CELL)**

*Nicolás Guerrero Chávez, Víctor Manuel Sámano Ortega, José Martín Medina Flores, José Alberto Zavala Bustos, Arnoldo Maeda Sánchez..... 1675-1686*

**VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO EMPLEANDO HARDWARE RASPBERRY PI 3 PARA APLICACIÓN EN MONITOREO REMOTO (UNMANNED AERIAL VEHICLE USING RASPBERRY PI 3 HARDWARE FOR REMOTE MONITORING APPLICATION)**

*Roberto Román Ibarra García, Humberto López Marín, Hugo Barragán Vargas, Moisés V. Márquez Olivera, Gerardo A. Martínez Fernández..... 1687-1704*

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA MAQUINA PARA LA ETAPA DE CONCHADO EN EL PROCESO DE FABRICACION DEL CHOCOLATE (DESIGN AND MANUFACTURE OF A MACHINE FOR THE CONCHING STAGE IN THE CHOCOLATE PROCESS)**

*Alan Emmanuel Ibarra Martínez, Zeltzin Suzett Fela Carmona García, Juan Pablo Aguilera Álvarez, Humberto Soto López..... 1705-1716*

**CONTROL DEL PENDUBOT: EL CASO DEL SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIA MEDIANTE EL REGULADOR LINEAL (PENDUBOT CONTROL: THE TRAJECTORY TRACKING CASE BY LINEAR REGULATOR)**

*Jaime Jalomo Cuevas, Erika Berenice Lázaro Flores, Ivan Rafael Sánchez Luna, Sergio Sandoval Pérez..... 1717-1725*

**SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES ELECTROCARDIOGRÁFICAS DE BAJO COSTO (LOW-COST SYSTEM FOR ELECTROCARDIOGRAPHIC SIGNAL ACQUISITION)**

*Jaime Jalomo Cuevas, Iván Rafael Sánchez Luna, Ramón Chávez Bracamontes, Erika Berenice Lázaro Flores..... 1726-1732*

**LABORATORIO VIRTUAL DE SEMICONDUCTORES DE POTENCIA (VIRTUAL LABORATORY OF POWER SEMICONDUCTORS)**

*José Gustavo Lara Ramírez, Fernando Zamora Chávez, Coral Martínez Nolasco, Juan José Martínez Nolasco, Alonso Alejandro Jiménez Garibay..... 1733-1742*

**REDUCCIÓN DEL TIEMPO DE CICLO EN UN MOLDE DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS IMPLEMENTANDO SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO CON SECCIÓN TRANSVERSAL CIRCULAR Y RECTANGULAR (CYCLE TIME REDUCTION IN A PLASTIC INJECTION MOLD BY IMPLEMENTING COOLING SYSTEMS WITH CIRCULAR AND RECTANGULAR CROSS SECTION)**

*Jonathan Salvador López López, Jesús Enrique Ramírez Morales, Francisco Javier Cervantes Vallejo, Karla Camarillo Gómez, José Francisco Louvier Hernández, Carolina Hernández Navarro..... 1743-1757*

**DETECCIÓN DE OBJETOS POR MEDIO DE ESCANEAMIENTO ULTRASONICO (DETECTION OF OBJECTS BY MEANS OF ULTRASONIC SCANNING)**

Jorge Alejandro López Ojeda, María José Navarro Morales, Eric Mario Silva Cruz..... 1758-1763

**DISEÑO Y CONTROL DE UN REHABILITADOR DE HOMBRO (DESIGN AND CONTROL OF A SHOULDER REHABILITATOR)**

Andrea Magadán Salazar, Andrés Blanco Ortega, José A. Santana Camilo, Fabio Abel Gómez Becerra, Edgar Antúnez Leyva..... 1764-1778

**ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE CORRIENTE EN UN TORNO USANDO INTEGRACIÓN NUMÉRICA (NUMERICAL INTEGRATION OF THE ENERGY CONSUMPTION BY CURRENT MEASUREMENTS TO DETERMINE THE USEFUL LIFE OF THE LATHE TOOL)**

Rafael Marín Marín, Carlos Juárez Toledo, Irma Martínez Carrillo..... 1779-1793

**DISEÑO, MODELO CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT NEUMÁTICO DE 4 DOF (DESIGN, KINEMATIC MODEL AND SIMULATION OF A 4 DOF PNEUMATIC ROBOT)**

José Armando Pérez Delgado, Juan Manuel Ramos Arreguín, Gerardo Israel Pérez Soto, Efrén Gorrostieta Hurtado..... 1794-1811

**SINTONIZACIÓN DE LAZO DE CONTROL DE TEMPERATURA EN EL HERVIDOR DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN (TUNING OF TEMPERATURE CONTROL LOOP IN THE BOILER OF A DISTILLATION COLUMN)**

Florencio Javier Pérez Núñez, José Guadalupe Zavala Villalpando, Oscar Michael Montoya Vallejo..... 1812-1829

**DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ESTRUCTURAS CELULARES FG (DEVELOPMENT AND NUMERICAL EXPERIMENTATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF CELLULAR STRUCTURES FG)**

Miriam Lucero Quemada Villagómez, Ramón Rodríguez Castro, Luis Alejandro Alcaraz Caracheo..... 1830-1850

**REALIDAD AUMENTADA: UNA APLICACIÓN MÓVIL PARA EDUCACIÓN BÁSICA (AUGMENTED REALITY: A MOBILE APPLICATION FOR BASIC EDUCATION)**

Norma Verónica Ramírez Pérez, Martín Laguna Estrada, Norma Natalia Rubín Ramírez, Adalberto Flores Medina..... 1851-1861

**GENERACIÓN DEL AGARRE DE PRECISIÓN MEDIANTE DEDOS ROBÓTICOS MULTIARTICULADOS CON CARACTERÍSTICAS ANTROPOMÉTRICAS Y ANTROPOMÓRFICAS BASADO EN MECANISMOS PLANARES DE 4 BARRAS (GENERATION OF PRECISION GRIP BY MEANS OF MULTI-ARTICULATED ROBOTIC WITH ANTHROPOMETRIC AND ANTHROPOMORPHIC CHARACTERISTICS BASED ON 4-BAR FLAT MECHANISMS)**

Alonso Reyes Rivas, Eduardo Morales Sánchez..... 1862-1873

**SERVERUS: LA IMPLEMENTACIÓN DEL BLOCKCHAIN EN LA VIDA COTIDIANA (SERVERUS: THE IMPLEMENTATION OF BLOCKCHAIN IN EVERYDAY LIFE)**

José Rubén Ruelas Amézquita, Enrique Salazar Baez, José Guillermo Martínez Manríquez, Mauro Santoyo Mora, Salvador Manuel Malagón Soldara, Ángel Cárdenas León, Gilberto González Gómez..... 1874-1883

**DETECCIÓN DE OVINOS PREÑADOS USANDO ALGORITMOS DE INTELIGENCIA Y VISIÓN ARTIFICIAL (SHEEP PREGNANCY DETECTION USING ARTIFICIAL INTELLIGENT AND ARTIFICIAL VISION ALGORITHMS)**

Rubén Sáenz Pérez, Moisés Vicente Márquez Olivera, Octavio Sánchez García, José David Duarte de la Cruz, Viridiana G. Hernández Herrera, Laura G. Marrujo García..... 1884-1903

**SENSADO DE ESCARCHA EN EVAPORADORES MEDIANTE CAÍDA DE PRESIÓN (FROST SENSING IN EVAPORATORS THROUGH PRESSURE DROP)**

José Pablo Sámano Muñoz, Martín Caudillo Ramírez..... 1904-1915

**MODELO DE ESPACIO-ESTADO DE UNA CELDA ALCALINA ELECTROLÍTICA PRODUCTORA DE HIDRÓGENO (STATE-SPACE MODEL OF AN ALKALINE ELECTROLYTIC CELL HYDROGEN PRODUCER)**

Víctor Manuel Sámano Ortega, Nicolás Guerrero Chávez, José Martín Medina Flores, José Alberto Zavala Bustos, Arnoldo Maeda Sánchez..... 1916-1937

**PLATAFORMA ME CATRÓNICA PARA LA ENSEÑANZA DE ROBÓTICA (MECHATRONIC PLATFORM FOR THE TEACHING OF ROBOTICS)**

Jorge Luis Sánchez Serrano, Humberto Bracamontes del Toro, Edgar David Guzmán Martínez, Juan José Carranza García, Jesús Ezequiel Molinar Solís..... 1938-1953

**DISPOSITIVO BIOMÉDICO PARA LA PREVENCIÓN DE PROBLEMAS DE ESPALDA BAJA MEDIANTE ELECTROMIOGRAFÍA SUPERFICIAL (BIOMEDICAL DEVICE FOR THE PREVENTION OF LOW BACK PROBLEMS THROUGH SUPERFICIAL ELECTROMIOGRAPHY)**

*María Fernanda Sandoval Aranda, Alonso Alejandro Jiménez Garibay, Yosafat Samano Flores, Antonio Hernández Zavala, Lucas Martínez Carreño, Silvia Chaparro Cárdenas..... 1954-1963*

**PLATAFORMAS PARA CONTROLADOR ACTIVO LINEAL APLICADO A LA DIRECCIÓN ASISTIDA AUTOMOTRIZ (PLATFORMS FOR LINEAR ACTIVE CONTROLLER APPLIED TO THE AUTOMOTIVE ASSISTED STEERING)**

*Sergio Sandoval Pérez, Gamaliel Rodríguez González, Luis Alfonso García Mendoza, Jaime Jalomo Cuevas. 1964-1981*

**MONITOREO TCP/IP EN LABVIEW® DE UNA SEÑAL ULTRASÓNICA MEDIANTE UN SISTEMA IoT, UTILIZANDO EL SISTEMA ARDUINO EN MODO SERVIDOR CON EL SHIELD DE ETHERNET (MONITORING TCP/IP IN LABVIEW® OF A ULTRASONIC SIGNAL IN AN IoT SYSTEM, BY USING ARDUINO IN SERVER MODE WITH ETHERNET SHIELD)**

*Eric Mario Silva Cruz, Francisco Adolfo Silva Cruz, Carolina Rosas Huerta, Franco Gabriel Caballero Julián.. 1982-1997*

**CARACTERIZACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL LLENADO DE UN TANQUE, APLICANDO UN SISTEMA IoT, CONFORMADO POR UN SENSOR ULTRASÓNICO, LA PLATAFORMA ARDUINO Y UNA APLICACIÓN MÓVIL (CHARACTERIZATION OF THE TRANSFER FUNCTION OF THE FILLING OF A TANK, APPLYING A SYSTEM IoT, CONFORMED BY AN ULTRASONIC SENSOR, THE ARDUINO PLATFORM AND A MOBILE APPLICATION)**

*Francisco Adolfo Silva Cruz, Franco Gabriel Caballero Julián, Eric Mario Silva Cruz, Carolina Rosas Huerta, Isaías Velásquez Cruz..... 1998-2016*

**IMPLEMENTACIÓN DEL ESTÁNDAR IEC 61850 A UN INVERSOR FOTOVOLTAICO (IMPLEMENTATION OF THE STANDARD IEC 61850 TO A PHOTOVOLTAIC INVERSOR)**

*Maximiliano Valencia Moctezuma, Sandra Verónica Moreno Tapia..... 2017-2026*

**PRUEBAS DE PENETRACIÓN A INVERSOR INTELIGENTE (INTELLIGENT INVERSOR PENETRATION TEST)**

*Maximiliano Valencia Moctezuma, Sandra Verónica Moreno Tapia..... 2027-2042*

**DESARROLLO DE UN ROBOT MÓVIL E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE VISIÓN ARTIFICIAL CON LIBRERÍAS ARUCO PARA NAVEGACIÓN AUTÓNOMA (DEVELOPMENT OF A MOBILE ROBOT AND IMPLEMENTATION OF AN ARTIFICIAL VISION SYSTEM USING ARUCO LIBRARIES FOR AUTONOMOUS NAVIGATION)**

*Raúl Aramis Villagómez Ortiz, Jeovany Velasco Avella, Arturo López Gallardo, José Guadalupe Zavala Villalpando, Karla Anhel Camarillo Gómez..... 2043-2055*

**PRESENTACIÓN CIITEC 2018.....**

**DESARROLLO DE COMPETENCIAS PROFESIONALES ANTE LOS RETOS TECNOLÓGICOS DE LA INDUSTRIA 4.0 EN MÉXICO (DEVELOPMENT OF PROFESSIONAL COMPETENCIES FOR THE TECHNOLOGICAL CHALLENGES OF INDUSTRY 4.0 IN MEXICO)**

*Julio Armando Asato España, Patricia Galván Morales, Daniela García Luna, José Emigdio Godoy Zárate, Claudia Cristina Ortega González..... 2057-2071*

**PROTOTIPO DE MONITOREO CARDIACO Y DETECCIÓN DE CAÍDAS APLICANDO IOT EN LA PLATAFORMA PARTICLE PHOTON (PROTOTYPE OF CARDIAC MONITORING AND DETECTION OF FALLS APPLYING IOT IN THE PARTICLE PHOTON PLATFORM)**

*Octavio Enrique Ávila Mexicano, Aldrin Barreto Flores, Verónica Edith Bautista López, Salvador Eugenio Ayala Raggi..... 2072-2087*

**REDES NEURONALES EN PREDICCIÓN DE MERCADOS FINANCIEROS: UNA APLICACIÓN EN LA BOLSA MEXICANA DE VALORES (NEURAL NETWORKS IN FINANCIAL MARKET PREDICTION: AN APPLICATION IN THE MEXICAN STOCK EXCHANGE)**

*Miguel Alfonso Becerra Montañez, Alejandro Ortega Hernández, Jhon Alejandro Montañez Barrera, Sinai López Castillo..... 2088-2104*

**CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE PREDICCIÓN PARA APOYO AL DIAGNÓSTICO DE DIABETES (CONSTRUCTION OF A PREDICTION MODEL TO SUPPORT THE DIABETES DIAGNOSIS)**

*Orlando Adrián Chan May, Jimmy Josué Peña Koo, Jean Marie Vianne Kinani, Manuel Abraham Zapata Encalada..... 2105-2122*

**ANÁLISIS DEL USO DE PLATAFORMAS DE APRENDIZAJE VIRTUAL EN EL PROCESO DE APRENDIZAJE DE PROGRAMACIÓN EN C (ANALYSIS OF THE USE OF VIRTUAL LEARNING PLATFORMS IN THE C PROGRAMMING LEARNING PROCESS)**

*Eder Constantino de Julián Posada, María Susana Ávila García..... 2123-2137*

**PROTOTIPO DE CABEZA ANIMATRÓNICA DE BAJO COSTO, UTILIZANDO MICROCONTROLADORES, SERVOMOTORES Y COMPONENTES 3D PARA APRENDER A MANIPULAR ROBOTS HUMANOIDES REALES (LOW COST ANIMATRONIC HEAD PROTOTYPE, USING MICROCONTROLLERS, SERVOMOTORS AND 3D COMPONENTS TO LEARN TO HANDLE REAL HUMANOID ROBOTS)**

*Rafael De la Rosa Flores, Eduardo M. Castillo Carcaño, Claudia Zepeda Cortez, Hilda Castillo Zacatelco, Ana P. Cervantes Márquez..... 2138-2152*

**VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO Y VISIÓN POR COMPUTADORA PARA EL MONITOREO DE FAUNA (UNMANNED AERIAL VEHICLE AND COMPUTER VISION FOR FAUNA MONITORING)**

*Luis Alberto Espejo Ponce, Yareny Rivera García, José Miguel Mendez Alonso, Abelino Lobato Gonzáles..... 2153-2167*

**UTILIZACIÓN DE SMARTPHONE COMO AUXILIAR EN LA REHABILITACIÓN DE RODILLA (USE OF SMARTPHONE AS AN AUXILIARY IN KNEE REHABILITATION)**

*Francisco Gutiérrez Vera, Carlos Reséndiz Santa Cruz, Claudia Cristina Ortega González, José Guillermo Fierro Mendoza..... 2168-2184*

**APOYO DIDÁCTICO DE LA TARJETA "RASPBERRY PI®" EN LA MATERIA DE SISTEMAS PROGRAMABLES (DIDACTIC SUPPORT OF THE CARD "RASPBERRY PI®" IN THE MATTER OF PROGRAMMABLE SYSTEMS)**

*Carlos Federico Hernández Farfán, Alma Lilia Márquez Beltrán, Daniel Esteban Ávila Macías..... 2185-2196*

**HACIA UN MECANISMO DE RAZONAMIENTO PARA LA INFERENCIA DE CONTEXTOS BASADA EN LA FUSIÓN DE FLUJOS DE DATOS (TOWARDS A REASONING MECHANISM FOR THE CONTEXTS INFERENCE BASED ON THE FUSION OF DATA FLOWS)**

*Jaime Elí Hernández Xilot, Guillermo Molero Castillo, Edgard Benítez Guerrero, Carmen Mezura Godoy..... 2197-2213*

**PARADIGMA EVOLUTIVO EN LA FORMULACIÓN DE RACIONES PARA GANADO BOVINO (EVOLUTIONARY PARADIGM IN THE FORMULATION OF RATIONS FOR BOVINE CATTLE)**

*Blanca Cecilia López Ramírez, Luis Ramón Sánchez Rico, Giovanni Guzmán Lugo, Mauricio Flores Hernández..... 2214-2231*

**HACIA LA ADQUISICIÓN, GESTIÓN Y PRESENTACIÓN DE DATOS CONTEXTUALES EN AMBIENTES DE APRENDIZAJE ASISTIDOS (TOWARDS THE ACQUISITION, MANAGEMENT AND PRESENTATION OF DATA CONTEXT IN ASSISTED LEARNING ENVIRONMENTS)**

*Luis Gerardo Montané Jiménez, Irene M. Jiménez Hernández, Guillermo Hernández Calderón..... 2232-2249*

**MEJORA DEL PROCESO DE SELECCIÓN DE PERSONAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE REDES NEURONALES: UN CASO DE ESTUDIO EN EL SECTOR TEXTIL (IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF SELECTION OF PERSONNEL THROUGH THE APPLICATION OF NEURAL NETWORKS: A CASE STUDY IN THE TEXTILE SECTOR)**

*Carlos Alfredo Morales Núñez, Alejandro Ortega Hernández, John Alejandro Montañez Barrera, Rocío Alfonsina Lizárraga Morales, Miguel Alfonso Becerra Montañez..... 2250-2265*

**ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE FACTORES INTRÍNSECOS EN CULTIVO IN VITRO DE LA STEVIA REBAUDIANA MORITA II (COMPUTATIONAL ANALYSIS OF INTRINSIC FACTORS IN CULTIVATION IN THE VITRO OF THE ESTEVIA REBAUDIANA MORITA II)**

*Jimmy Josué Peña Koo, Ángel Virgilio Domínguez May, José Ildelfonso Espinosa Pacho, Orlando Adrián Chan May, Holzen Martínez García..... 2266-2275*

**SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN DOCUMENTAL PARA EL ARCHIVO DEL "CENTRO DE LAS ARTES SAN LUIS POTOSÍ CENTENARIO" (DOCUMENTARY AUTOMATION SYSTEM FOR THE ARCHIVE OF THE "CENTRO DE LAS ARTES SAN LUIS POTOSÍ CENTENARIO")**

*Isnardo Reducindo, Abraham García De la Torre..... 2276-2292*

**APLICACIÓN DE UN SENSOR TÉRMICO EN EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN ROEDOR (APPLICATION OF A THERMAL SENSOR IN THE STUDY OF THE BEHAVIOR OF A RODENT)**

*Jesús Manuel Roa Escalante, Aldrin Barreto Flores, María Isabel Martínez García, Salvador Eugenio Ayala Raggi, Verónica E. Bautista López..... 2293-2307*

**EXCEL COMO AUXILIAR EN LA GENERACIÓN DE REPORTES EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN (EXCEL AS AN AUXILIARY IN THE GENERATION OF REPORTS IN INFORMATION SYSTEMS)**

*Eleazar Rosas Centeno, María Susana Ávila García, María Isabel Vázquez de la Rosa, Hugo Armando Aguilera García..... 2308-2317*

**INTERNET DE LAS COSAS (IoT), UNA ALTERNATIVA PARA EL CUIDADO DEL AGUA (INTERNET OF THINGS (IoT), AN ALTERNATIVE FOR THE CARE OF WATER)**

*Francisco Javier Ruiz Ortega, Karina Esquivel Murillo, Dora Ofelia Rodríguez Martínez, María Estela Rodríguez Torres, Rosario Duarte Ramírez..... 2318-2330*

**ESTRATEGIA PARA EL DESPLIEGUE Y SINCRONIZACIÓN DE UN SITIO WEB EN LA NUBE (STRATEGY FOR THE DEPLOYMENT AND THE SYNCHRONIZATION OF A WEBSITE IN THE CLOUD)**

*José Jesús Sánchez Farías, Abraham Josué Galván Torres, Rubén Torres Frías, Juan Ignacio Cerca Vázquez, Luis Alberto López González..... 2331-2345*

**ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD DE CULTIVOS DE MICROALGAS MEDIANTE EL TRATAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES (ESTIMATION OF THE DENSITY OF MICROALGAE CROPS THROUGH THE DIGITAL TREATMENT OF IMAGES)**

*Edgar Daniel Sánchez Nieto, Guillermo Martínez Flores, Armando Monge Quevedo..... 2346-2356*

**APLICACIÓN MÓVIL CON REALIDAD AUMENTADA PARA LA ASIGNATURA DE METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN (MOBILE APPLICATION WITH AUGMENTED REALITY FOR THE COURSE OF INVESTIGATION METHODOLOGY)**

*Anabelem Soberanes Martín, José Luis Castillo Mendoza, Aideé Peña Martín..... 2357-2372*

**E-EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE DE LOS ESTUDIANTES DE INFORMÁTICA ADMINISTRATIVA (E-EVALUATION OF THE LEARNING FOR ADMINISTRATIVE COMPUTER SCIENCE STUDENTS)**

*Anabelem Soberanes Martín, José Luis Castillo Mendoza, Esperanza Coteria Regalado..... 2373-2391*



## **EDITORIAL**

La actividad científica es un modo de ser, de pensar, de hacer y de sentir. Un modo de vivir la vida. Tiene que ver con una manera particular de percibir e interpretar la realidad, una mezcla de razón, intuición y emoción, de ilusión y de pasión. Es un proceso serio y sistematizado de producción de conocimientos. Producir ciencia sin una amplia cultura científica puede ser tan débil como producir y no publicar o publicar sin haber investigado. Existe una gran tendencia que relaciona la investigación como algo sutilmente extraño o complementario a la actividad académica. Tal vez porque en muchas instituciones de educación superior se ha centrado la atención en dar clases y no en investigar. Tal vez porque ha sido más fácil reproducir que producir el conocimiento. Y esta es una trampa en la que muchas instituciones están enjauladas: pensar que es mejor, por barato, reproducir que producir<sup>1</sup>.

Afortunadamente, tanto a nivel nacional e internacional se llevan a cabo eventos académicos donde por medio de conferencias se exponen resultados de proyectos de investigación científica y tecnológica, reportes de caso o ensayos.

El Tecnológico Nacional de México en Celaya, en esta edición de su revista *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 los eventos académicos CIER, SENIE, CISMe y CIITEC, llevados a cabo en septiembre, octubre y noviembre del 2018.

Cada uno de los artículos que aquí se publican fue evaluado por dos investigadores expertos en el tema, siendo el Comité Técnico de cada evento el responsable 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 con sus normas de publicación.

---

<sup>1</sup> *El texto original fue publicado en la Revista Telos Vol. 2 (2): 369-380, 2000.*

## **PRESENTACIÓN SENIE 2018**

La Semana Nacional de Ingeniería Electrónica (SENIE) es un evento que busca servir de foro en el cual los investigadores y estudiantes de las diversas áreas de la Ingeniería Electrónica puedan intercambiar experiencias, conocimientos y establecer vínculos de colaboración, mediante actividades tales como: presentación de ponencias, conferencias magistrales y conferencias técnicas.

La décimo cuarta edición del evento se realizó del 3 al 5 de octubre de 2018 en las instalaciones de la Universidad Panamericana campus Aguascalientes. Esta institución goza de un reconocido prestigio a nivel nacional, por la calidad de enseñanza que se imparte, la investigación y divulgación del quehacer científico y la alta habilitación de su planta de profesores-investigadores.

Se recibieron 122 trabajos para su evaluación provenientes de 70 distintas instituciones de educación superior y centros de investigación, tanto públicos como privados, de 27 estados del país y del extranjero. La revisión de los trabajos fue realizada por un Comité Técnico formado por más de 80 especialistas en las distintas temáticas, varios de ellos adscritos a instituciones en el extranjero. Como resultado del proceso de revisión, fueron aceptados para su presentación 63 artículos. Es de esta forma que la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Azcapotzalco, la Universidad Panamericana campus Aguascalientes y Revista Pistas Educativas cumplen con el objetivo de proporcionar un foro para la divulgación de los trabajos de investigación relacionados con la Ingeniería Electrónica y sus diversas ramas.

La responsabilidad y trabajo como comité editorial estuvo a cargo del Dr. Miguel Magos Rivera, Ing. José Antonio Lara Chávez e Ing. Zabdiel Eliud Gutiérrez Flores. Por su parte, Pistas Educativas tuvo bajo su cuidado la edición de los textos de acuerdo con sus normas de publicación.

### **Comité Organizador**

### **XIV Semana Nacional de Ingeniería Electrónica 2018**

# **CERTIFICACIÓN EN JAVA DE LAS COMPETENCIAS EN PROGRAMACIÓN DE COMPUTADORAS DE LOS ESTUDIANTES DE LA LICENCIATURA EN SISTEMAS COMPUTACIONALES EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIAPAS**

*CERTIFICATION IN JAVA OF COMPETENCES IN COMPUTER PROGRAMMING OF THE COMPUTATIONAL SYSTEMS PROGRAM STUDENTS AT THE AUTONOMOUS UNIVERSITY OF CHIAPAS*

***Luis Antonio Álvarez Oval***

Universidad Autónoma de Chiapas  
*loval@unach.mx*

***Christian Mauricio Castillo Estrada***

Universidad Autónoma de Chiapas  
*cmce@unach.mx*

***Erwin Bermúdez Casillas***

Universidad Autónoma de Chiapas  
*erwin.casillas@unach.mx*

## **Resumen**

Este artículo describe el proceso de integración de que conduce a estudiantes del estudio académico hasta obtener una certificación industrial en el lenguaje de programación JAVA por medio del programa de certificación de la empresa Develop Talent & Technology. Para un estudiante recién egresado de una carrera de Ciencias de la Computación, un trabajo como programador suele ser el inicio de una carrera en la industria nacional de Tecnologías de Información y Comunicaciones. Los 15 estudiantes que presentaron el examen son aquellos inscritos en la materia optativa denominada “Taller de Certificación Java” y todos aprobaron dicho examen. En particular, se ha elegido a Java para certificarse, ya que el Tiobe Index indica que es el lenguaje de programación más popular a nivel mundial. Asimismo se explica el motivo para elegir a Develop Talent & Technology como organismo certificador para nuestros estudiantes, siendo esta la primera ocasión en que DTT apoya el proceso de certificación en la FCP.

**Palabras clave:** Certificación de la industria, educación basada en la industria, mercado de trabajo en tecnologías de información y comunicación.

## **Abstract**

This article describes the process that leads students from academic study to obtain an industrial certification in the JAVA programming language through the certification program of the company Develop Talent & Technology. A student recently graduated from a career in Computer Science, a job as a programmer is usually the start of a career in the Information and Communications Technology industry. Although the business trend of digital transformation initiatives has increased the demand for programmers and therefore their market price. Now it has gone from being the first job to one that requires certified skills. In particular, Java has been chosen to be certified, since the Tiobe Index indicates that it is the most popular programming language worldwide. The reason for choosing Develop Talent & Technology as the certifying instance for our students is also explained.

**Keywords:** Industry certification, education based on industry, labor market in information and communication technologies.

## **1. Introducción**

Este artículo describe el proceso para certificar las competencias en el área de programación de computadoras 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 de certificación de la empresa Develop Talent & Technology.

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 y la primer reacreditación se obtuvo en mayo de 2018. El CONAIC requiere que la institución fomente los procesos de certificación industrial entre los estudiantes de LSC, y otorga mejores calificaciones a la institución por lograr que estos acrediten los exámenes. En la FCP iniciamos el proceso de fomentar la certificación de las competencias de Programación de Computadoras desde 2006, cuando la LSC fue incluida en un programa de PROSOFT-Sun Microsystems para certificar a los estudiantes en el lenguaje de programación Java, 6 estudiantes y 1 docente lograron certificarse. Recientemente, en 2015, con el apoyo de IBM, se ha logrado la certificación de 2 estudiantes y 1 docente en la base de datos DB2. Mientras que, en 2016, a través de otro programa con recursos federales se consiguió que los estudiantes y docentes se capacitaran en el lenguaje de programación RobotC, 7 docentes y 12 alumnos lograron aprobar el examen de certificación. La certificación fue otorgada por Carnegie Mellon University.

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 ofreció su punto de vista de los lenguajes de programación que lideraban el mercado en esa época: PHP, .NET y Java. El primero era un producto de software libre, mientras que los últimos dos eran productos propietarios que requerían del pago de costosas licencias. Sin embargo, nos explicó que Java sería liberado con una licencia de Software Libre para finales de 2005. Así que el claustro de docentes decidió adoptar a Java como el lenguaje de programación que se ofrecería a los estudiantes de la facultad, claro, compartiría créditos con el popular lenguaje C. En 2006, el Dr. Pérez Dávila impartió a los docentes, en las instalaciones de la FCP, los dos primeros cursos de Java y con ello se inician los 12 años de enseñanza de dicho lenguaje de programación en esta casa de estudios.

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 [Diario Oficial de la Federación, 2017], 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.

Develop Talent & Technology (DTT) es una empresa de capacitación tecnológica integral, en el sector de Tecnologías de Información (TI), certificando y capacitando a empresas, profesionistas y universitarios, formando recursos humanos especializados en alta tecnología para cubrir la demanda del mercado nacional e internacional. DTT tiene alianzas con las principales marcas y universidades del país, así como con proyectos y subsidios del Gobierno Federal y Estatal, para la creación de becas en el sector TI.

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 2017 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 Boca del Río, Veracruz y la Ciudad de Oaxaca, estos dos lugares se encuentran a 12 y 9.5 horas de distancia respectivamente 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 los estudiantes para acceder a recursos económicos, el costo generado para conseguir una certificación se vuelve inalcanzable.

## **2. Métodos**

De acuerdo al Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales: la certificación de competencias es el proceso a través del cual las personas demuestran por medio de evidencias, que cuentan, sin importar como los hayan adquirido, con los conocimientos, habilidades y destrezas necesarias para cumplir una función a un alto nivel de desempeño de acuerdo con lo definido en un Estándar de Competencia [Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales, 2018].

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: PROSOFT y DTT.

### **Salarios del mercado mexicano de TIC**

La revista Software Gurú estudia la evolución del mercado laboral mexicano en el sector de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), desde el 2010 [Revista Software Gurú, 2010], aunque no garantiza una muestra representativa ya

que son encuestas abiertas, la información contenida en estos artículos permite encontrar tendencias del mercado laboral mexicano de TIC. Sutliff 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". [Sutliff, 2000]

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 2017 [Revista Software Gurú, 2017], en la sección "Tecnologías utilizadas" en la tabla 12 - "Desglose por lenguaje de programación" se observa que el salario promedio que recibe un programador es de \$33,770 pesos mensuales, mientras que en la tabla 16 - "Desglose por certificación" se aprecia que el sueldo promedio para un profesional certificado es de \$38,131 pesos. A simple vista se aprecia un sobresueldo aproximado del 13% por contar con la certificación de la industria. 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**

Aunque sabemos que la empresa Oracle ofrece un programa de certificación Java, no se tomó en consideración debido a los elevados costos que este representa.

Se evaluaron dos programas que ofrecen certificaciones de la industria, para lograr la certificación de las habilidades de los estudiantes: PROSOFT y DTT. La elección que se hizo fue determinada por el costo que implica obtener la certificación, por lo que la elección fue tomar el camino que nos ofrece DTT.

### **PROSOFT**

El PROSOFT es el programa para el Desarrollo de la Industria del Software y la Innovación [Secretaría de Economía, 2018]. Siendo un programa de la Secretaría de Economía, es una política pública que fomenta al sector de Tecnologías en México y la innovación en los sectores estratégicos.



La adopción de Tecnologías de la Información por parte de las empresas es una de las formas más rápidas de incrementar su productividad y de prepararse para innovar por su alto valor agregado. En la actualidad donde diversos servicios necesarios en una sociedad del conocimiento se encuentran soportados de manera importante en las TI, es importante que nuestro país cuente con un sector de TI de clase mundial estrechamente integrado con los demás sectores económicos.

Con la fusión de los programas presupuestarios R003 Fondos para Impulsar la Innovación (FINNOVA) y S151 Programa para el Desarrollo de la Industria del Software (PROSOFT), se creó el S151 Programa para el Desarrollo de la Industria del Software (PROSOFT) y la Innovación, a fin de generar sinergias en la atención de los sectores e industrias con alto contenido de innovación y aplicaciones de tecnologías de información. Para acceder a los recursos que ofrece este programa federal, es necesario esperar la apertura de la Convocatoria para la recepción de Solicitudes de Apoyo por parte de la Secretaría de Economía. Sin embargo, la convocatoria [Secretaria de Economía, 2018] de este año solo fue para la creación de Centros de Innovación Industrial (CII) para la formación de capital humano y oferta de servicios especializados. Algo para lo que no estábamos preparados y que estamos desarrollando en este momento. Nuestro plan es el de asociar la convocatoria de PROSOFT con el proyecto de Zona Económica Especial (ZEE) de Puerto Chiapas para desarrollar un concepto de fábrica de software que atienda las necesidades de los empresarios locales: agricultores, industriales y ganaderos. Aunque este es un plan que se está trabajando de manera conjunta con los diferentes actores que inciden en el plan de desarrollo de la ZEE. Aunque con PROSOFT es posible acceder a la certificación de cualquier tecnología, es necesario incluir los gastos de transporte, alimentación y hospedaje de los estudiantes. Tampoco fue posible acceder al programa de certificaciones de la iniciativa MexicoFirst, ya que dicha iniciativa fue cancelada desde el año 2016.

## **DTT**

De acuerdo al sitio web de DTT [Develop Talent & Technology, 2018], el Programa de Certificaciones consiste en un Modelo de Capacitación y Certificación

Empresarial para Instituciones de Educación Superior y Media Superior en los cuales en coordinación con los Gobiernos Estatales y las Marcas se ofrecen Cursos de Certificación de las Marcas a precios subsidiados por todos los actores incluso con apoyos de la Industria Privada, las Instituciones y otros actores participantes, permitiendo así que los Alumnos cubran el mínimo de costo final, normalmente entre un 10% y no más de un 25% del costo total; lo cual permite que más alumnos tengan alcance a cursos y certificaciones no accesibles para cualquier bolsillo y con ello lograr impactar a un mayor número de alumnos.

En el mismo sitio mencionan: “No hay nada, absolutamente nada más importante que si un alumno desea certificarse, encuentre los mecanismos para hacerlo en la calidad adecuada y cerca de él al precio más bajo posible. Todo ello tiene sus implicaciones, la más reciente de ellas, en 2016 con la desaparición de México First y las cancelaciones de contratos asociados, los cambios en los entregables, y otros, Develop tuvo que de los 8,124 alumnos atendidos en ese año, aplicar sin fondos exámenes a más de 1,000 alumnos en Tecnologías Android, iOS y PhoneGap y se encuentra aplicando actualmente más de 500 exámenes en Tecnologías Oracle en todo el país, sin responsabilidad legal alguna, sino con la responsabilidad que moral y social que esto amerita. Para ser consistentes con nuestra misión, no podemos dejar a alumnos sin concluir su Ciclo de Capacitación y Certificación”.

Finalmente explican: “aun cuando la salida de México First del Mercado debería haber reflejado un incremento de precio de un 100%, o el costo del Voucher al que tenemos acceso por compras masivas aun así creció un 39% del año anterior al actual por la subida del dólar o el 4% anual promedio de inflación, Develop apenas subió sus precios un 20% para lograr mantenerlo accesible al alumno. Esto es y seguirá siendo nuestra empresa, un canal para el Crecimiento Profesional y Económico de nuestros estudiantes”.

Puesto que DTT se apoyado en la iniciativa PROSOFT y después fue el modelo para la creación de la iniciativa MexicoFirst, hemos confiado en la experiencia de esta empresa para la certificación de las competencias en programación de computadoras de nuestros estudiantes y docentes. Una de las ventajas que nos ofrece DTT, es que los exámenes de certificación son efectuados en las

instalaciones de la FCP de la UNACH, lo que permite evitar el traslado de nuestros estudiantes a otras ciudades del país y mantener lo más bajo posible el costo de obtener una certificación industrial.

### **Comparación de los programas**

La decisión de iniciar el proceso de certificación en el lenguaje de programación Java fue tomada en enero de 2018, se esperó algún tiempo para buscar el acceso a los recursos del Prosoft, para cuando dicha convocatoria apareció los estudiantes ya habían acordado pagar el programa que ofrece la empresa DTT. Al leer la convocatoria nos dimos cuenta que ya no había fondos para efectuar certificaciones directas, sino que requería la creación de Centros de Innovación Industrial. Así que no tuvimos oportunidad de contrastar los programas.

### **Integración de la certificación con el grado académico**

Las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) avanzan muy rápidamente, las universidades deben seguir el ritmo para lograr la incorporación de estas en la educación para que los estudiantes asimilen las competencias necesarias para este siglo, las cuales según el informe Delors [Delors, 1996] son: la comunicación y colaboración; la creatividad e innovación; el pensamiento crítico; y la solución de problemas.

Aun cuando el plan de estudios de la LSC que se imparte en la UNACH no está basado en competencias, se ha trabajado en dos vertientes:

- La actualización del plan de estudios de LSC a uno basado en el modelo de competencias.
- La creación de un plan de estudios basado en el perfil 3 del CONAIC también basados en competencias. La primera vertiente aún no se concluye, mientras que la segunda ya se ha implantado en la FCP, dicho programa está por cumplir su primer año de existencia.

Aunque desde el primer semestre de la LSC se ofrece a los estudiantes materias asociadas con la programación de computadoras, no es sino hasta el cuarto

semestre en que se le ofrece la materia de Programación Orientada a Objetos (POO) donde tienen el primer contacto con el lenguaje Java. En quinto semestre, cuando se ofrece la materia de administración de base de datos, se desarrollaron laboratorios de práctica en algunos de los cuales se vuelve a usar dicho lenguaje de programación. Para el sexto semestre, una materia denominada Proceso Administrativo, requiere que los estudiantes hagan un sistema aplicado a una pequeña empresa completamente desarrollado con Java. Finalmente, durante el octavo y noveno semestres se ofrecen materias optativas para implementar Java en su versión empresarial, es decir, para crear sistemas de información basados en la Web. Además, se ofrece la materia optativa denominada “Taller de certificación Java”. Toda esta experiencia prepara al estudiante para conocer a fondo este lenguaje de programación, claro está, el claustro docente se ha comprometido con el uso y aplicación de Java a lo largo de las materias que se imparten en diferentes semestres. Esta transversalidad exige que el docente que imparte la materia de POO cubra a fondo y en su totalidad el programa del plan de estudios. Así que una condición que se tiene es que el docente que imparte la materia de POO cuente con una certificación en el lenguaje Java.

La LSC ha generado egresados los últimos 14 años, muchos de ellos laboran fuera del estado de Chiapas, en particular están concentrados en las ciudades de: México, Guadalajara y Monterrey, incluso algunos de ellos laboran en el extranjero, Guatemala, Perú, Ecuador y España son receptores de estos estudiantes altamente calificados. Estos egresados terminan compartiendo su experiencia laboral con el claustro docente, y han solicitado que enseñemos el uso de herramientas, lenguajes y frameworks específicos. Estos requerimientos coinciden con quienes afirman que “la certificación establece un estándar de competencias en áreas y roles de trabajo específicos” [Montante, 2001]. Mientras que Cosgrove 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 [Cosgrove, 2004].

DTT ha establecido un convenio de colaboración con la FCP de la UNACH, el docente que conduce el programa obtuvo la certificación de Java en un proceso que

se impulsó en la FCP en su época de estudiante, por lo que conoce perfectamente las acciones que cada estudiante debe realizar para enfrentar el examen de certificación. El examen elegido es el Oracle Certified Associate 7 (OCA). En la FCP los docentes promueven las certificaciones entre los estudiantes y además los mismos participan en el proceso para adquirir una certificación propia, en el pasado reciente, se han conducido procesos de certificación para DB2, Android y ahora Java. Los docentes que imparten el núcleo central de la carrera poseen al menos una de las siguientes certificaciones: Java, DB2, RobotC y Android, por lo que se conoce el esfuerzo necesario para lograr el objetivo. A continuación, se describe el proceso para llegar al examen de certificación:

- **Preparación del laboratorio de cómputo y/o equipos personales:** Todos los equipos deben tener instalado el Java Development Kit (JDK) de la versión 7, mismo que puede ser descargado de la página de Oracle®, debido a que en esta versión es en la que se basa la certificación.  
Una vez instalado el lenguaje Java sobre el sistema operativo Windows, es necesario configurar las herramientas para poder usar los comandos desde la línea de comandos, para esto es necesario agregar la ruta donde se encuentra instalada la carpeta “bin” del JDK a la variable de entorno del sistema llamada Path, en caso de utilizar otro sistema operativo, la instalación se autoconfigura.
- **Candidatos a examen:** El proceso de certificación requiere que el docente se capacite y desarrolle proyectos en la tecnología elegida para después transmitir a los estudiantes los conceptos que se evalúan en el examen de certificación. Por la naturaleza del proceso de certificación se debe incentivar al alumno a que estudie por su cuenta propia y en la asesoría grupal compartir información de los temas estudiados y así convertir las horas de asesorías en debate 100% productivo, algo fundamental para que este proceso funcione.
- **Curso de inducción:** Debido a que la Licenciatura en Sistemas Computacionales establece como materia optativa en el octavo semestre un “Taller de Certificación”, los alumnos inscritos a esta materia son candidatos

para presentar el examen y así conseguir un mayor porcentaje de alumnos aprobados, así que el temario de la materia se basa en la guía de certificación otorgado por DTT, de tal manera que durante el semestre se aprovecha para capacitar a los alumnos en el proceso de certificación, además de compartir con ellos la experiencia del docente en los exámenes que ha presentado previamente.

- **Curso en línea:** DTT ha creado una plataforma para capacitación en línea que funciona de forma parecida a las plataformas Coursera, Academica y Udacity. La FCP y DTT establecen fecha de inicio y fin del curso en línea, antes de iniciar el curso los estudiantes deben efectuar el pago y notificar el mismo al área de atención a universidades, con ello se libera el acceso a la plataforma.
- **Lectura adicional:** De la experiencia previa del docente se toma como libro de apoyo al “OCA/OCP Java SE 7 Programmer I & II Study Guide” de los autores Katie Sierra y Bert Bates, en el pasado ha servido como referencia para acreditar el examen de certificación. El libro está reconocido por Oracle y tiene ejercicios para poner en práctica lo aprendido, además muestra aspectos truculentos del lenguaje.
- **Examen de prueba:** Durante el semestre en que los alumnos cursan la materia “Taller de Certificación”, los alumnos son sometidos a 2 exámenes de preparación, para realizar estos exámenes se cuenta con el apoyo del libro “OCA Java SE 7 Programmer I & II Practice Exams”, estos exámenes son el primer enfrentamiento que tienen los alumnos como preparación para el examen de certificación. DTT también ofrece un examen de pruebas llamado “Simulador”, este examen es requisito para que los candidatos presenten el examen de certificación, de tal manera que si los candidatos no aprueban el examen prueba no tienen acceso al examen de certificación, DTT permite 2 intentos para aprobar el examen de prueba y un solo intento para el examen de certificación.
- **Examen de Certificación:** Una vez concluida la capacitación y que el estudiante haya aprobado de forma satisfactoria el examen de prueba ha

llego el momento de enfrentar el examen de certificación, este momento es el más esperado por los estudiantes aunque esa emoción puede jugar una mala pasada ya que puede que no les permita descansar un día antes o que los nervios los agobien, el no saber manejar las emociones y ansiedades que conlleva presentar el examen puede provocar que algunos candidatos no aprueben el examen. Las expectativas de aprobar examen suelen ser altas, pero no siempre se logran los resultados esperados. Debido a la cantidad de emociones que se manejan antes del examen tratamos de tener una plática motivacional alentándolos a concentrarse y mantener una actitud proactiva con respecto a este examen.

### **3. Resultados**

Iniciaron el proceso de certificación 18 estudiantes candidatos, pero por motivos familiares 3 de ellos no pudieron finalizar el proceso. Al examen de certificación se presentaron 15 candidatos y el docente a cargo del proyecto, el cual tuvo efecto en el Laboratorio Linux A de la FCP, el 8 de junio del 2018. Como el docente se certificó en la tecnología y en la misma versión a finales del 2016, no presentó el examen en esta ocasión por lo tanto únicamente los candidatos estudiantes presentaron dicho examen. Una gran sorpresa se ha llevado el claustro de docentes y DTT, los 15 alumnos alcanzaron la certificación incluso un candidato obtuvo la calificación perfecta, el 10. Del total de estudiantes examinados 9 obtuvieron una calificación mayor a 8, mientras que 6 de ellos alcanzaron calificación entre 6 y menos de 8.

### **4. Discusión**

Al finalizar el examen se tuvo una plática con todos los candidatos ya certificados para tener retroalimentación acerca de la experiencia que acababan de pasar y que mejor que sus dichos para que aporten su experiencia desde su perspectiva con el objetivo de encontrar áreas de oportunidad de mejora. Aunque nuestra plática estaba planeada para motivar a los estudiantes que reprobaran el examen ya que es posible presentarlo cualquier cantidad de oportunidades, esto no fue necesario, ya que todos aprobaron. Sin embargo, obtuvimos algunos datos interesantes, 15 de

los estudiantes mencionaron que era necesario fortalecer la comprensión del idioma inglés, esto debido a que el libro de apoyo está escrito en ese idioma y se les dificultó la comprensión de algunos ejercicios, mientras que 3 candidatos comentaron que no pudieron dormir un día antes del examen por la ansiedad.

## **5. Conclusiones**

Al parecer el conocimiento generado durante 12 años de experiencia en la impartición del lenguaje de programación Java en la carrera de LSC y los comentarios que hacen los egresados a aquellos que aún no concluyen sus estudios de licenciatura, ha generado que los muchachos se comprometan con aprender el lenguaje de programación. Por lo que solo fue necesario explicar que se espera de ellos en el examen de certificación. Se usarán los comentarios que han vertido los jóvenes para platicar con el director del área que se encarga de impartir el idioma inglés para generar la mejora en la comprensión del idioma. Con respecto a los comentarios del exceso de ansiedad, invitaremos a la encargada del Centro Psicopedagógico de la FCP a escuchar de viva voz estos comentarios, para que genere cursos dirigidos a los estudiantes para el manejo de emociones y estrés. Ya que otros grupos de estudiantes se encuentran inmersos en procesos de preparación para asistir a concursos de robótica educativa.

El objetivo de someter a mas estudiantes al proceso de certificación de las competencias tiene mejores expectativas al contar con el apoyo de DTT, también es necesario que otras competencias sean certificadas, aunque dependemos de los cambios de estrategias de los programas que ofrecen Prosoft o las empresas tecnológicas como Oracle, IBM o Microsoft.

## **7. Bibliografía y Referencias**

- [1] Consejo Nacional de Normalización y Certificación de Competencias Laborales: <http://www.cec-mendezdocurro.ipn.mx/Centro-de-Evaluacion/Paginas/CONOCER.aspx>.
- [2] Delors, J. et al. (1996). La educación encierra un tesoro. Informe a la Unesco de la Comisión Internacional sobre la Educación para el Siglo XXI. París,



- Francia: Unesco: [http://www.unesco.org/education/pdf/DELORS\\_S.PDF](http://www.unesco.org/education/pdf/DELORS_S.PDF).
- [3] Develop Talent & Technology: <https://www.develop.com.mx/>.
- [4] Diario oficial de la federación. Prosoft 3.0 (s.f.)  
[http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5508808&fecha=22/12/2017](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5508808&fecha=22/12/2017)
- [5] 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.
- [6] Revista Software Gurú. Estudio de salarios 2010. <https://sg.com.mx/content/view/1045>.
- [7] Revista Software Gurú. Estudio de salarios 2017. <https://sg.com.mx/buzz/reporte-salarios-y-mejores-empresas-2017>.
- [8] Secretaría de Economía. Acerca de Prosoft 3.0 (s.f.). <https://prosoft.economia.gob.mx/acercade/>.
- [9] Secretaria de Economía. Convocatoria para ingreso de solicitudes 2018. <https://prosoft.economia.gob.mx/convocatorias/>.
- [10] Scott, C. (2015). El futuro del aprendizaje 2. ¿Qué tipo de aprendizaje se necesita en el siglo XXI? Investigación y prospectiva en educación. Documentos de trabajo Unesco: <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002429/242996s.pdf>.
- [11] Sutliff, Integrating Academics and Industry: A Challenge for Both Sides. ACM Journal of Computer Documentation. (24:1), 2000, Pp. 33-38.

# **SOLUCIÓN NUMÉRICA Y LINEALIZADA DE UN MODELO DE SISTEMA PLANAR AUTÓNOMO NO LINEAL, PARA UN EQUIPO DE DOS TANQUES INTERCONECTADOS**

*NUMERICAL AND LINEARIZED SOLUTION OF A MODEL OF AN AUTONOMOUS, NON-LINEAR PLANAR SYSTEM, FOR A TWO INTERCONNECTED TANKS EQUIPMENT*

**Anaya Eredias Carlos**

Universidad de Sonora  
*canaya@industrial.uson.mx*

**Anaya Pérez María Elena**

Universidad de Sonora  
*elena.anaya@unison.mx*

**León Martínez Martín Francisco**

Universidad de Sonora  
*leonm.94@gmail.com*

## **Resumen**

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar matemáticamente la solución de un modelo que representa el comportamiento dinámico de un equipo de dos tanques interconectados, como continuidad de un trabajo presentado previamente. Para el desarrollo se retoma el modelo dinámico asociado a un arreglo de tanques interconectados que aparece en [Anaya, 2015] y que desde el punto de vista matemático representa un sistema planar autónomo no lineal de dos ecuaciones entrelazadas por lo que solo presenta un grado de libertad. Se realiza su solución numérica y se identifican sus propiedades, principalmente su no controlabilidad. La solución numérica se determina con el método Runge-Kutta, utilizando el software MATLAB®, obteniendo así representaciones en gráficos temporales de las variables, así como la de espacio de estado con el campo de direcciones. Se presenta también una segunda solución a través de la factibilidad de linealizar el sistema de ecuaciones diferenciales encontrado, haciendo una aproximación de primer grado.

Se lleva a cabo el análisis entre ambas soluciones, así como su comparación para finalmente terminar el trabajo con las conclusiones que llevan a que no existen puntos de equilibrio ya que el sistema está en constante retroalimentación por la interconexión, lo cual se pretende implementar en el equipo físico para simular sistemas de procesos con puntos de operación determinados.

**Palabras Claves:** MATLAB®, Método Runge-Kutta, modelo no lineal, sistema planar autónomo, tanques interconectados.

### **Abstract**

The objective of this paper is to mathematically develop the solution of a model that represents the dynamic behavior of an equipment of two interconnected tanks, as continuity of a previously presented work. For development, the dynamic model associated with an interconnected tank arrangement that appears in [Anaya, 2015] is taken up and from the mathematical point of view it represents a non-linear autonomous planar system of two interlaced equations, so it only has one degree of freedom. Its numerical solution is carried out and its properties are identified, mainly its non-controllability. The numerical solution is determined with the Runge-Kutta method, using the MATLAB® software, thus obtaining representations in temporary graphs of the variables, as well as the state space with the address field.

A second solution is also presented through the feasibility of linearizing the system of differential equations found, making a first-degree approximation.

The analysis is carried out between both solutions, as well as their comparison to finally finish the work with the conclusions that lead to there being no equilibrium points since the system is in constant feedback for the interconnection, which is intended to be implemented in the physical equipment to simulate process systems with determined points of operation.

**Keywords:** *Autonomous planar system, interconnected tanks, MATLAB®, non-linear model, Runge-Kutta Method.*

## **1. Introducción**

Un modelo matemático de un proceso se define como un conjunto de ecuaciones que expresan las características esenciales del fenómeno o proceso en términos matemáticos. Estos modelos se caracterizan por su universalidad, empleo de un lenguaje preciso, sin ambigüedades y facilidades de manipulación analítica e implementación computacional. Todo modelo posee estructura y parámetros. La estructura es la descripción cualitativa del proceso mediante ciertas ecuaciones y los parámetros son valores constantes que modifican la estructura [Ribas, 2011]. Los sistemas dinámicos aparecen al tratar de especificar mediante un modelo matemático procesos en los que es posible describir la dependencia en el tiempo de un punto en un espacio geométrico mediante la aplicación de una fórmula o “regla”. Surgen, entonces, con naturalidad en virtualmente todas las áreas de la ciencia modelos netamente teóricos como en el caso de los autómatas celulares [Schi, 2008]. La definición anterior, así de amplia, permite incluir dentro de la definición de sistemas dinámicos fenómenos tan dispares como el movimiento en un sistema mecánico o el número de individuos de una población de peces en un lago en el tiempo; pasando inclusive por fenómenos relacionados con procesos químicos en los que hay intercambio de materia o la predicción del clima [Torres, 2013]. Entre estos últimos se tiene el ejemplo del sistema de tanques interconectados, ampliamente utilizado en procesos industriales, y que de acuerdo con sus características el modelo matemático corresponde a un sistema planar autónomo no lineal [Torres, 2013]. Los métodos numéricos son utilizados para aproximar soluciones de ecuaciones en los casos en que una solución exacta no es posible determinarla vía métodos algebraicos. Se construyen sucesivas aproximaciones que convergen a la solución exacta de una ecuación o un sistema de ecuaciones [Remani, 2013]. El método numérico por utilizar para la solución es el de Runge-Kutta, [Yang, 2015], [Giuseppe, 2017], que de acuerdo con [Edwards, 2009], es un método considerablemente más exacto que el método de Euler mejorado y que en la práctica es más ampliamente utilizado que los métodos de Euler y Euler mejorado. Con la finalidad de facilitar la obtención de la solución se utiliza el software

MATLAB®, que tiene la ventaja de incluir este método numérico de integración, dejando como aportación en este trabajo, una adecuación del código presentado en [Mathews, 2001] y además se obtiene la solución por un camino diferente, a través de la factibilidad de linealizar el sistema de ecuaciones diferenciales encontrado, obteniendo una solución linealizada [Smith, 2010].

## 2. Métodos

La metodología aplicada para el presente trabajo fue en base a lo descrito en el diagrama de bloques de la figura 1, el cual tiene su base en la metodología propuesta por [Ribas, 2011] con adecuación a fases.

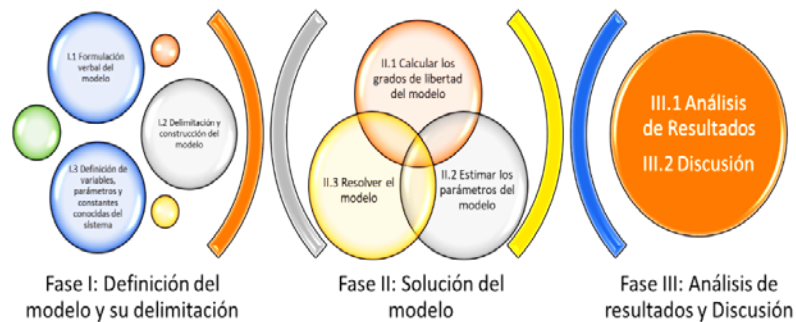


Figura 1 Estructura de la metodología.

### Aplicación de la metodología

Se lleva a cabo la aplicación de la metodología propuesta de acuerdo con el diagrama de la figura 1:

- **Fase I: Definición del modelo y su delimitación:**

- ✓ **Formulación verbal del modelo.** Se dispone del sistema de equipo de dos tanques interconectados cerrado, como el mostrado en la figura 2, observando que los dos tanques tienen las mismas dimensiones encontrándose interconectados entre sí.

El objetivo es desarrollar matemáticamente la solución de un modelo que representa el comportamiento dinámico de un equipo de dos tanques interconectados alrededor de puntos de operación, obteniendo desde el punto de vista matemático un sistema planar autónomo no

lineal de dos ecuaciones entrelazadas por lo que solo presenta un grado de libertad.

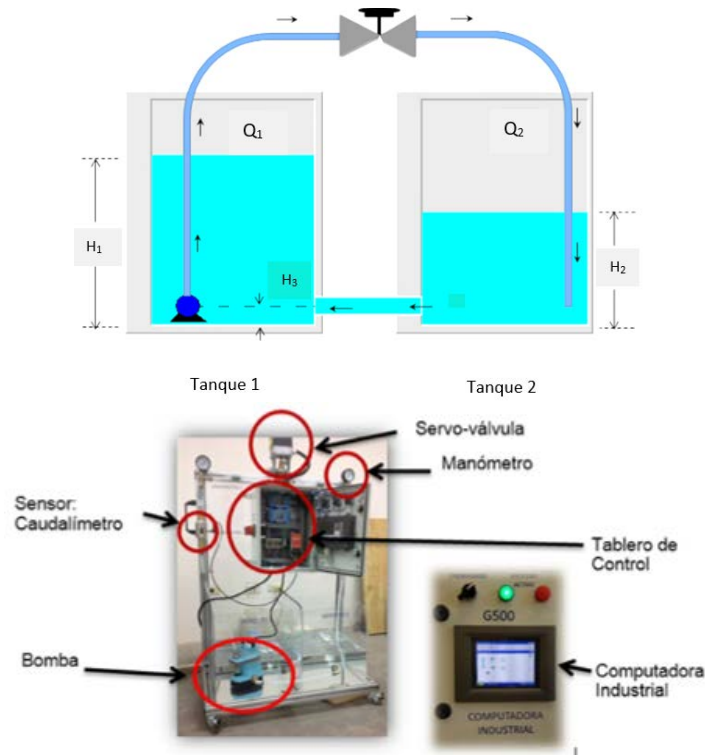


Figura 2 Esquema y fotografía de sistema de equipo de tanques interconectados.

- ✓ **Delimitación y construcción del modelo.** El trabajo previo presentado por [Anaya, 2015], desarrolla una solución experimental que se busca sea estable en puntos de operación, utilizando el mismo equipo de sistema de dos tanques interconectados, debido a que es un sistema representativo en laboratorio, en distintos procesos industriales (industria alimenticia, industria del papel), etc. Las ecuaciones generales del sistema y sus restricciones utilizando las leyes físicas de la dinámica de fluidos y tomadas de dicho trabajo, corresponden a las ecuaciones 1 y 2, que indican el cambio de volumen en cada uno de los tanques, lo cual es igual a la diferencia entre el flujo que va de un tanque a otro.

$$\frac{dH_1}{dt} = Q_{12} - Q_{21} \quad (1)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = Q_{21} - Q_{12} \quad (2)$$

$Q_{21}$  y  $Q_{12}$ , están definidas por las ecuaciones 3 y 4.

$$Q_{12} = C_{d1} a_1 (2g(H_1 - H_3))^{1/2} \quad (3)$$

$$Q_{21} = C_{d2} a_2 (2g(H_2 - H_1))^{1/2} \quad (4)$$

Al ser un sistema cerrado esto implica que independientemente de la dirección del flujo, el cambio de volumen será el mismo, siendo el signo lo que determina su dirección.

El sistema está limitado a las siguientes consideraciones para la operación adecuada del sistema:

- $H_3 < H_1 < H_2$
  - $H_2 > H_1 > 0.1900 \text{ m}$
  - $H_{1min} = 0.2000 \text{ m}, H_{1max} = 0.3600 \text{ m}$
  - $H_{2min} = 0.2200 \text{ m}, H_{2max} = 0.3800 \text{ m}$
- ✓ **Definir variables, parámetros y constantes.** Las variables involucradas son las alturas y los flujos de volumen (figura 2). Se tienen parámetros como los coeficientes de descarga para el orificio entre los tanques 1 y 2, así como el coeficiente de descarga para el orificio de salida hacia el tanque 2. Las constantes definidas son la gravedad y las dimensiones de los tanques. La descripción de los parámetros para el sistema, que intervienen en las ecuaciones 3 y 4 del modelo, se presenta en la tabla 1.

Tabla 1 Definición de variables, parámetros y constantes de las ecuaciones 3 y 4.

Símbolo	Descripción del parámetro	Valor
$A_1$	Área transversal del tanque 1.	0.119025 m <sup>2</sup>
$A_2$	Área transversal del tanque 2.	0.119025 m <sup>2</sup>
$a_1$	Área del orificio entre tanque 1 y tanque 2.	0.0001266 m <sup>2</sup>
$a_2$	Área del orificio de salida hacia tanque 2.	0.0000716363 m <sup>2</sup>
$C_{d1}$	Coeficiente de descarga para el orificio entre tanque 1 y tanque 2.	0.75
$C_{d2}$	Coeficiente de descarga para el orificio de salida hacia el tanque 2.	0.5
$g$	Constante gravitacional.	9.81 m/s <sup>2</sup>

Además, es importante considerar que las medidas máximas de las tres alturas son las proporcionadas en tabla 2.

Tabla 2 Valores de las variables de altura.

Variable	Descripción	Medida de altura en metros
H <sub>1</sub>	Altura de nivel de líquido en el tanque 1.	0.25
H <sub>2</sub>	Altura de nivel en el tanque 2.	0.25
H <sub>3</sub>	Altura definida entre el centro del orificio entre tanque 1 y tanque 2 a la base.	0.04

• **Fase II Solución del modelo:**

- ✓ **Cálculo de los grados de libertad del sistema.** El modelo en estudio representado por la ecuación 4, tiene 2 variables y 1 ecuación, con lo que se obtienen los grados de libertad utilizando la ecuación 5.

$$GL = \text{No. de variables} - \text{No. de ecuaciones} \quad (5)$$

$$GL = 2 - 1 = 1$$

- ✓ **Estimar los parámetros del modelo.** Para este paso se toman los datos de los parámetros y constantes presentados en la tabla 1 y se sustituyen en las ecuaciones 3 y 4, obteniendo así las ecuaciones 6 y 7.

$$\frac{dH_1}{dt} = 0.0035(H_1 - H_3)^{\frac{1}{2}} - 0.0013(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = 0.0013(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} - 0.0035(H_1 - H_3)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Este es un modelo no lineal para las derivadas, ya que intervienen términos con raíz cuadrada.

- ✓ **Solución del modelo.** En la solución de un modelo dinámico no lineal se utiliza una etapa previa que implica visualizar el campo de direcciones en el diagrama de fases de las variables del modelo. Esto permite determinar existencia de posibles puntos de equilibrio, los cuales pueden ser estables o inestables. A la vez, brinda una indicación de la existencia de solución y su comportamiento.



Para mostrar el modelo dinámico asociado a los valores de los parámetros, se hace un reacomodo de términos en 4 obteniendo la estructura mostrada por la ecuación 8.

$$\frac{dH_1}{dt} = -0.0013(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} + 0.0035(H_1 - H_3)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Debido a su alta dependencia este modelo puede formularse de acuerdo a la ecuación 9, ya que ambos niveles de líquido en los tanques varían en la misma proporción con respecto al tiempo, pero uno sube y el otro disminuye.

$$\frac{dH_2}{dt} = - \frac{dH_1}{dt} \quad (9)$$

Del cálculo diferencial e integral, se tiene que las funciones  $H_1(t)$  y  $H_2(t)$  sólo difieren de una constante, ecuaciones 10 y 11.

$$\int_{H_{20}}^{H_2} \frac{dH_2}{dt} dt = - \int_{H_{10}}^{H_1} \frac{dH_1}{dt} dt \quad (10)$$

$$H_2(t) - H_{20} = -(H_1(t) - H_{10}) \quad (11)$$

Donde  $H_{10}$  representa a  $H_1$ , y  $H_{20}$  a  $H_2$  en  $t = 0$ . En la ecuación 12 se representa  $H_2$  en función de  $H_1$ .

$$H_2(t) = -H_1(t) + H_{10} + H_{20} \quad (12)$$

Por lo tanto, en el espacio de fases  $H_1(t)$  y  $H_2(t)$  tienen una relación lineal, lo que no necesariamente es cierto para las series temporales.

Los sistemas planares son muy estudiados ya que son fáciles de visualizar por encontrarse en dos dimensiones y de manera rápida es posible determinar el comportamiento de puntos de equilibrio. Para encontrar los puntos de equilibrio se sigue el siguiente procedimiento:

- Se igualan a cero las derivadas.
- Se encuentra la solución del sistema lineal o no lineal como será en este caso de estudio.

- Se determina mediante visualización el punto de equilibrio.

Para encontrar la solución del sistema en estudio, se desarrollan las siguientes dos opciones:

- Tratamiento no lineal con el método numérico de Runge-Kutta [Butcher, 2007].
- A través de la factibilidad de linealizar el sistema de ecuaciones diferenciales encontrado, haciendo una aproximación de primer grado.

### **Solución A. Tratamiento no lineal con el método numérico de Runge-Kutta**

Para esta solución lo que se necesita es el espacio de fase [Molero, 2012], se utiliza la derivada de  $H_2$  con respecto a  $H_1$ , para mostrar cómo se mueven las direcciones para  $H_1$  y para  $H_2$ . Se debe seleccionar un punto de referencia, el cual comúnmente es el origen (0,0) que puede ser inestable o estable [Nagle, 2005]. Si es estable, se tienen dos formas asintóticamente estables, en la que no importa que tan alejado se encuentre del origen, siempre regresará a él, es decir al punto de equilibrio. El otro caso no lo es.

A continuación, utilizando la función “quiver” de MATLAB se elabora el programa basado en el modelo y en el rango de operación del sistema indicado en la tabla 3, para así mostrar la solución gráfica al correr el programa en MATLAB® [Mathews, 2001], con adecuación al caso de estudio.

```
h1=linspace(0.2,0.25,10);  
h2=linspace(0.25,0.35,10);  
[h1,h2]=meshgrid(h1,h2);  
dh1=.0035*sqrt(h1-.04)-.0013*sqrt(h2-h1);  
dh2=-dh1;  
quiver(h1,h2,dh1,dh2);grid;hold on
```

Tabla 3 Rango de operación seleccionado para  $H_1$  y  $H_2$ .

Nivel de líquido	Rango de alturas en metros	
$H_1$	0.20	0.25
$H_2$	0.25	0.35

De acuerdo a [Nagle, 2005], se considera que lo mostrado en la gráfica de espacio de fase, en la figura 3, es de un sistema inestable.

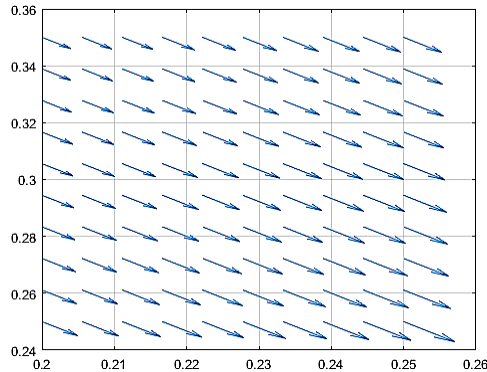


Figura 3 Solución gráfica en espacio de fase- Sistema Inestable.

Función de Runge-Kutta en MATLAB® ([Mathews, 2001], con adecuación al caso de estudio):

```
function [T Z]=rks4(F,a,b,Za,M)
% Datos
% F es el sistema de ecuaciones como subrutina
(function) tipo renglón
% a y b son los límites del intervalo de solución
% Z= [x1a x2a...xna] es la condición inicial
% M es el número de pasos para determinar la solución
% Resultados
h=(b-a)/M;
T=zeros(1,M+1);
Z=zeros(M+1,length(Za));
T=a:h:b;
Z(1,:)=Za;
for j=1:M
    k1=h*feval(F,T(j),Z(j,:));
    k2=h*feval(F,T(j)+(h/2),Z(j,:)+(k1/2));
    k3=h*feval(F,T(j)+(h/2),Z(j,:)+(k2/2));
    k4=h*feval(F,T(j)+h,Z(j,:)+k3);
    Z(j+1,:)=Z(j,:)+(k1+2*k2+2*k3+k4)/6;
end
```

Después de lo anterior se continua con la aplicación de solución numérica a un punto de operación seleccionado de acuerdo con lo indicado en la tabla 4, y respetando la condición  $0.04 < H_1 < H_2$ , lo cual se encuentra expresado en la sustitución de  $H_3$  en las ecuaciones 7 y 8, para obtener las expresiones 13 y 14.

$$\frac{dH_1}{dt} = -0.0013(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} + 0.0035(H_1 - 0.04)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$\frac{dH_2}{dt} = 0.0013(H_2 - H_1)^{\frac{1}{2}} - 0.0035(H_1 - 0.04)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Tabla 4 Punto de operación seleccionado para obtener una solución al modelo.

Nivel de líquido	Altura en metros
<b><math>H_1</math></b>	0.23
<b><math>H_2</math></b>	0.28

Programa en MATLAB®:

```
function
W=modelo(t,x)
h1=x(1);h2=x(2)
w=[.0035*sqrt(h1-.04)-.0013*sqrt(h2-h1),-.0035*sqrt(h1-.04)+.0013*sqrt(h2-h1)]
end
```

Aplicación de ambas funciones para resolución del sistema:

```
a=0;b=15;za=[.21,.3];
[t,x]=rks4(@modelo,a,b,za,2000);
H1=x(:,1);H2=x(:,2);
plot(H1,H2,'r')
```

Las figuras 4 y 5 muestran las soluciones numéricas en el tiempo para  $H_1$  y  $H_2$ , por lo tanto, el sistema tiene solución lineal dentro del espacio de fases.

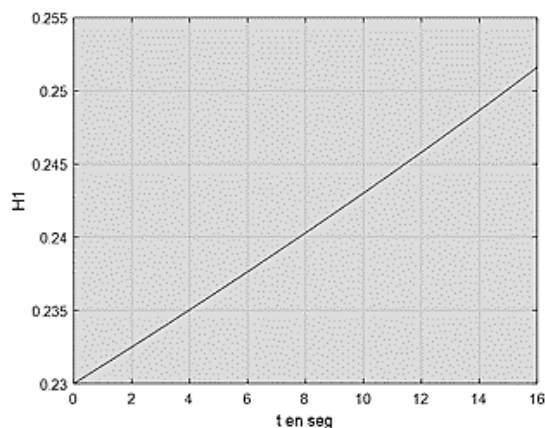


Figura 4 Gráfica temporal de  $H_1$ .

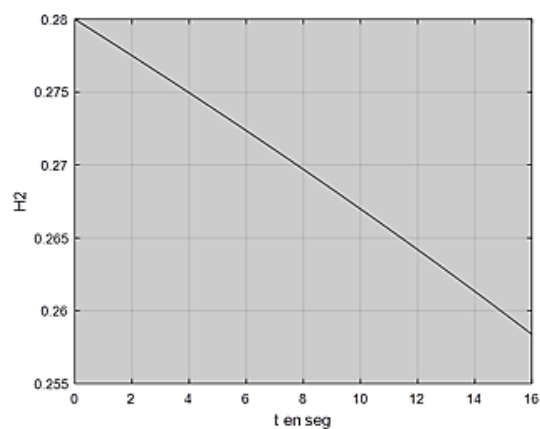


Figura 5 Gráfica temporal de  $H_2$ .

La figura 6 muestra gráficamente, la solución lineal del sistema, representada con la línea negra, dentro del espacio de fase.

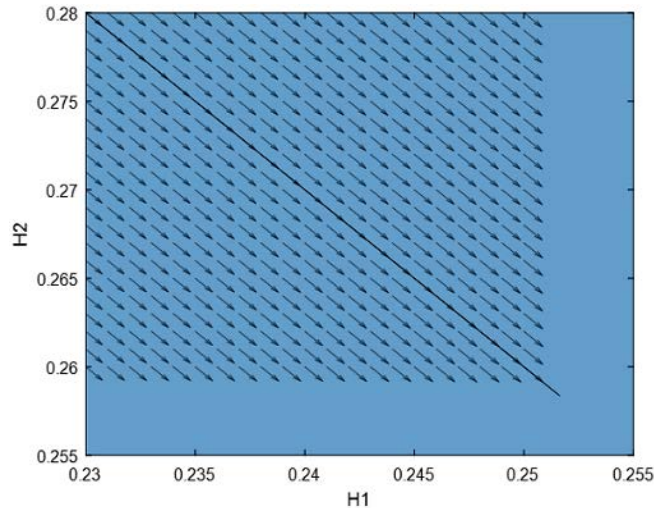


Figura 6 Solución numérica.

**Solución B. A través de la factibilidad de linealizar el sistema de ecuaciones diferenciales encontrado, haciendo una aproximación lineal de primer grado**

Considerando que las derivadas son funciones de  $H_1$  y  $H_2$  se puede obtener la matriz Jacobiana para obtener sus propiedades y caracterizar el sistema de manera lineal para un punto en particular.

Si  $\frac{dH_1}{dt} = F(H_1, H_2)$  y  $\frac{dH_2}{dt} = G(H_1, H_2)$  entonces la matriz Jacobiana asociada al sistema no lineal se presenta mediante la ecuación 15.

$$J(H_1, H_2) = \begin{bmatrix} \frac{0.0013}{(H_2 - H_1)^{1/2}} + \frac{0.0035}{(H_1 - 0.04)^{1/2}} & \frac{-0.0013}{(H_2 - H_1)^{1/2}} \\ -0.0013 & \frac{0.0035}{(H_1 - 0.04)^{1/2}} \\ \frac{0.0013}{(H_2 - H_1)^{1/2}} & \frac{0.0013}{(H_2 - H_1)^{1/2}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

De la ecuación 13 se obtiene un determinante con valor cero, lo que implica que el sistema no es controlable. Si se toma  $(H_{10}, H_{20}) = (0.23, 0.28)$  entonces la matriz tiene la forma numérica mostrada en la expresión 16.

$$J(H_1, H_2) = \begin{bmatrix} 0.0138 & -0.0058 \\ -0.0138 & 0.0058 \end{bmatrix} \quad (16)$$

La ecuación 17 representa la aproximación lineal del sistema de ecuaciones diferenciales no lineal.

$$\begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix}_{(H_1, H_2)} = \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix}_{(H_{10}, H_{20})} + J(H_1, H_2)|_{(H_{10}, H_{20})} \begin{bmatrix} H_1 - H_{10} \\ H_2 - H_{20} \end{bmatrix} + \epsilon \quad (17)$$

$F$  y  $G$  son las derivadas como funciones de  $H_1$  y  $H_2$ , y  $J$  es la matriz Jacobiana evaluada en  $H_{10}$  y  $H_{20}$ , más  $\epsilon$  que representa el error.

Sustituyendo se obtiene la ecuación 18.

$$\begin{bmatrix} \frac{dH_1}{dt} \\ \frac{dH_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0011 \\ -0.0011 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial H_1} & \frac{\partial F}{\partial H_2} \\ \frac{\partial G}{\partial H_1} & \frac{\partial G}{\partial H_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 - 0.25 \\ H_2 - 0.32 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Ya evaluando las derivadas vemos lo expresado en la ecuación 19.

$$\begin{bmatrix} \frac{dH_1}{dt} \\ \frac{dH_2}{dt} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0.0011 \\ -0.0011 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.0073 & -0.0029 \\ -0.0073 & 0.0029 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 - 0.25 \\ H_2 - 0.32 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Debido a que el determinante de la matriz Jacobiana es igual a cero se espera un valor propio igual a 0.

Mediante MATLAB® se obtienen los valores propios y vectores propios.

$$[v, d] = \text{eig}(A)$$

$$v_1 = \begin{bmatrix} 0.7071 \\ -0.7071 \end{bmatrix}$$

$$v_2 = \begin{bmatrix} 0.3692 \\ 0.9294 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 = 0.0102$$

$$\lambda_2 = 0.0000$$

Con la información anterior se obtiene la solución homogénea mediante ecuación 20.

$$H_h = C_1 \begin{bmatrix} 0.3692 \\ 0.9294 \end{bmatrix} + C_2 e^{0.0102t} \begin{bmatrix} 0.7071 \\ -0.7071 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$C_1$  y  $C_2$  representan constantes de integración que dependen de las condiciones iniciales.

Por lo tanto, desarrollando la expresión vectorial de la expresión 20 se obtienen las componentes de  $H_h$  en ecuaciones 21.

$$\begin{aligned} H_{1h} &= 0.3692C_1 + 0.7071C_2e^{0.0102t} \\ H_{2h} &= 0.9294C_1 - 0.7071C_2e^{0.0102t} \end{aligned} \quad (21)$$

### 3. Resultados

En análisis llevado a cabo se encuentra que, dado un punto de operación en la región de interés, en este caso (0.28, 0.32), no existen puntos de equilibrio ya que el sistema está en constante retroalimentación. Cuando ocurren aproximadamente 16 segundos (referencia figuras 4 y 5), las variables  $H_1$  y  $H_2$  alcanzan el mismo valor lo que no implica el equilibrio, se presenta una turbulencia.

Además, es posible llevar a cabo la linealización del sistema aplicando una serie de Taylor y obteniendo una solución.

### 4. Discusión

Cuando el equipo inicia su funcionamiento los niveles de líquido, físicamente, son el mismo y al momento de apagarlo, vuelven a ese mismo estado, esto es por la característica de encontrarse interconectados. Es importante verificar, en el equipo, los resultados aquí obtenidos respecto al tiempo de 16 segundos mencionado en la sección de resultados.

De acuerdo con el objetivo establecido en este trabajo con las características particulares del caso de estudio, se llevó a cabo el análisis matemático planteado, obteniendo resultados que indican que tenemos un sistema sin puntos de equilibrio.

Como trabajo futuro se tiene el realizar un proyecto en el cual, el análisis numérico desarrollado en este trabajo será llevado a la implementación en el equipo físicamente, con la finalidad de corroborar los resultados y aplicar valores para distintos puntos de operación en la simulación del equipo, ya que estos puntos de operación finalmente representan combinación de nivel de líquido para cada uno

de los tanques lo cual podrá depender del proceso industrial que se busque simular.

## **5. Conclusión**

Disponiendo del modelo matemático que representa la dinámica de un equipo de dos tanques interconectados con las características planteadas en el presente trabajo, se logró el objetivo de realizar un análisis, basado en sus propiedades, sobre el comportamiento en el tiempo y el espacio de estado, obteniendo como resultado que a este modelo no se le encuentran puntos de equilibrio resolviendo por linealización o por el método numérico de Runge-Kutta.

Con lo anterior se concluye que el objetivo planteado para el presente trabajo ha sido logrado, ya que se ha determinado, de acuerdo con los resultados, que es posible llegar a una solución utilizando métodos de análisis numérico que concuerdan con soluciones experimentales en el sentido de que, para este caso particular, se tiene un sistema que no llega al equilibrio, sino que las soluciones giran alrededor de puntos de operación establecidos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Anaya P., M.E., & Benitez B., V.H., Puesta en operación de un sistema de entrenamiento de control de procesos y evaluación de controladores industriales- Tesis Doctoral. Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP). Puebla, México.2015.
- [2] Butcher, J. Runge-Kutta methods, Scholarpedia, 2(9):3147.
- [3] Edwards, C.H., & Penny, D.E., Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera. Editorial Pearson. Cuarta edición. México,2009.
- [4] Izzo, G., & Jackiewicz, Z. Highly stable implicit-explicit Runge-Kutta Methods-Applied Numerical Mathematics Volume 113, March 2017, Pages 71-92 Elsevier.
- [5] Mathews, J. H., Fink, K. D. Métodos numéricos con MATLAB®, 3ª. Edición, 2001, Editorial Prentice Hall.



- [6] Molero, M., Salvador, A., Menarguez, T., Garmendia. Capítulo 12: Sistemas Dinámicos, Libro Análisis matemático para Ingeniería. 2012.
- [7] Remani, C. Numerical Methods for Solving Systems of Nonlinear Equations. Lakehead University Thunder Bay, Ontario, Canada. 2013.
- [8] Ribas G., M., Hurtado V., R., Garrido C., N., Domenech L., F., Sabadí D., R. Metodología para la modelación matemática de procesos. Caso de estudio, fermentación alcohólica, ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 45, núm. 1, enero-abril, 2011, pp. 37-47. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar. Ciudad de La Habana, Cuba.
- [9] Schi, J. L. Cellular Automata: A Discrete View of the World. Wiley & Sons, 2008.
- [10] Smith, H.L. An Introduction to delay differential equations with applications to the Life Sciences-Monograph. Springer, June23, 2010. Tempe, Arizona.
- [11] Torres H., J.A. Tesis de Maestría Sistemas Dinámicos Planos Jorge Alberto Torres Henao. Facultad de Ciencias, Escuela de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2013.

# **ESTUDIO DE OCUPACIÓN ESPECTRAL DE SERVICIOS DE COMUNICACIÓN DE 85 MHZ A 2.5 GHZ EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

## *SPECTRUM OCCUPANCY MEASUREMENTS ON COMMUNICATION SERVICES FROM 85 MHZ TO 2.5 GHZ IN SAN LUIS POTOSI, MEXICO*

**David Antonio Arista Ramírez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*davrista@gmail.com*

**Marco Aurelio Cárdenas Juárez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*mcardenas@fc.uaslp.mx*

**Ulises Pineda Rico**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*u\_pineda@fc.uaslp.mx*

**Armando Arce Casas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*armando.arce@uaslp.mx*

**Enrique Stevens Navarro**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*estevens@fc.uaslp.mx*

### **Resumen**

El espectro radioeléctrico es un recurso limitado para las comunicaciones inalámbricas, en México este es administrado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) el cual asigna las frecuencias que van desde los 3 kHz hasta los 300 GHz. El hecho de que todo este ancho de banda este atribuido para ser usado en ciertos servicios de comunicación no significa que todas las bandas sean utilizadas en determinado momento y lugar. Con el fin de determinar la ocupación real del espectro radioeléctrico en determinadas bandas, se realizó una campaña de medición espectral en la ciudad de San Luis Potosí utilizando tres distintos umbrales de decisión propuestos en la literatura. En este trabajo se presenta la metodología utilizada para la realización de dicha campaña, así como

del cálculo del umbral de decisión y ciclo de trabajo de cada banda. Los resultados muestran que el ciclo de trabajo en las bandas de estudio varía en relación con el umbral de decisión utilizado, además de que la ocupación depende del tipo de servicio ofrecido en cada banda.

**Palabras Claves:** Ciclo de trabajo, espectro radioeléctrico, ocupación espectral.

## **Abstract**

*Radioelectric spectrum is a limited resource for wireless communication, in Mexico it is managed by the Federal Telecommunication Institute whom allocate frequencies between 3 kHz and 300 GHz, the fact that this whole bandwidth is reserved for its use in certain communication services does not mean that all bands will be used at a particular time and place. In order to measure the real spectrum occupancy in certain bands, a spectrum measurement campaign was held in the city of San Luis Potosi, three different decision thresholds were used in this paper. In this paper we present the methodology used in this campaign, also decision threshold and duty cycle calculation are explained. Results show that duty cycle in the studied bands vary depending on decision threshold used, also we conclude that spectrum occupancy depends on the kind of service offered in the band.*

**Keywords:** *duty cycle, radioelectric spectrum, spectrum occupancy.*

## **1. Introducción**

Desde el inicio de las comunicaciones, el medio de transmisión ha jugado un papel importante en el desarrollo y eficiencia de las mismas. Las primeras tecnologías se basaban en medios de transmisión alámbricos, lo cual implica un medio controlado y directo entre usuarios, si la capacidad del cable era comprometida por el número de usuarios, simplemente se instalaban cables extra y de esta manera se ampliaba la capacidad del sistema. Con el advenimiento de las comunicaciones inalámbricas, las cuales comparten el mismo medio de propagación, los gobiernos tuvieron que crear políticas para la correcta distribución del espectro radioeléctrico, esto provoco que a las diferentes

tecnologías les fueran asignadas bandas específicas. El problema de esta distribución fija es que el total del espectro radioeléctrico fue asignado a diferentes servicios, lo que provoca que servicios que tienen gran cantidad de usuarios en determinado momento y lugar, puedan saturarse, provocando fallas en la disponibilidad, mientras que otros servicios son poco o nulamente usados en esa misma región. Es por esto que se han propuesto métodos de acceso dinámico al espectro [López,6], estos buscan solucionar el problema de la escasez de espectro partiendo de la idea de que un usuario puede no estar usando su banda asignada lo cual abre la posibilidad a otros usuarios de usarla de manera oportunista. Para la correcta implementación de estos sistemas es importante conocer la ocupación espectral, esto con el fin de identificar bandas que podrían ser candidatas para usar en acceso dinámico al espectro.

El espectro radioeléctrico es un recurso que es administrado por las autoridades de cada país, estas se encargan de dividirlo en bandas que puedan ser usadas por diferentes usuarios y para distintos servicios. En México el espectro radioeléctrico es administrado por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) y las frecuencias reservadas para distintos servicios se detallan en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias [IFT,5], las bandas reservadas en este consideran un ancho de banda que va desde los 3 kHz hasta los 300 GHz. El hecho de que el espectro radioeléctrico este asignado en su totalidad no significa que todas las bandas de frecuencia sean utilizadas en determinado momento y lugar; es por esto que es importante conocer la ocupación real del espectro en determinada región, el ciclo de trabajo (DC) es el parámetro utilizado para conocer el porcentaje de tiempo que una frecuencia se encuentra en uso.

La figura 1 muestra la ubicación de dichas campañas mientras que la tabla 1 contiene algunos parámetros utilizados en estas.

En 1998 se realizó el primer estudio de ocupación espectral reportado en la IEEE [Sanders,10], en este se midió la ocupación en diversas ciudades de California, Estados Unidos. En 2005 se realizó un estudio donde se compara el uso del espectro en ciudades y áreas rurales, se estableció que el DC promedio en áreas rurales es mucho menor que en áreas urbanas [Petrin,9]. En Nueva Zelanda se

realizó uno de los estudios de ocupación espectral de mayor duración a la fecha [Chiang,3], en este se tomaron muestras durante 7 semanas y además se comparan los resultados de interiores y exteriores. En [López,7] se midió el DC Promedio en la ciudad de Barcelona, en este se propuso una nueva metodología para medir el DC, en la cual se fija con base en la probabilidad de falsa alarma deseada. En Australia se realizó una campaña que midió la ocupación espectral usando una plataforma de medición montada en un vehículo, en esta se comparó la ocupación espectral con la densidad poblacional [Al-Hourani,2].

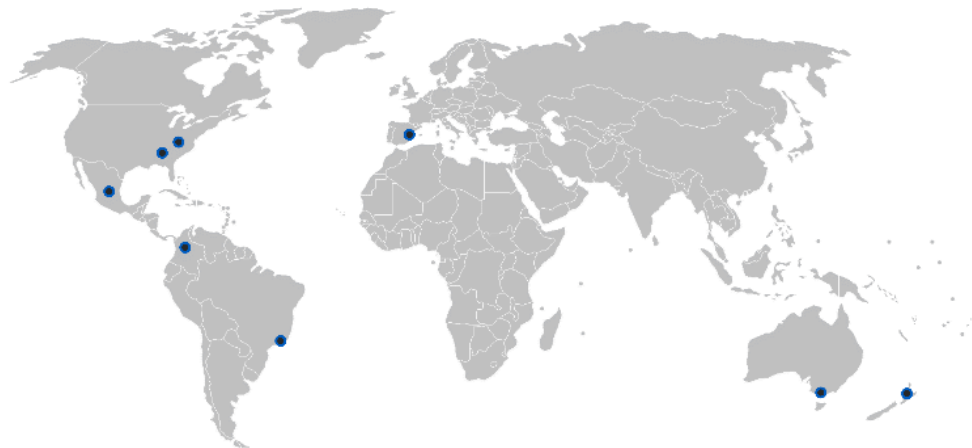


Figura 1 Ubicación de las principales campañas de medición alrededor del mundo.

Tabla 1 Detalles de las Campañas de Medición realizadas.

Año	Lugar	Span (MHz)	DC (%)	Referencia
2005	Atlanta, Carolina del Norte (Estados Unidos)	400 - 7,200	3.2-22.4	[Petrin,9]
2007	Auckland (Nueva Zelanda)	806 - 2,750	6.21	[Chiang,3]
2009	Barcelona (España)	75 - 3,000	22.57	[López,7]
2012	Bogotá (Colombia)	54 – 6,000	53.8	[Pedraza,8]
2013	Rio de Janeiro (Brasil)	255 – 2,690	19.6	[de Lima,4]
2013	San Luis Potosí (México)	30 - 910	12.5	[Aguilar,1]
2015	Melbourne (Australia)	400 – 6,000	-	[Hourani,2]

En América latina la primera campaña de ocupación de la medición espectral se realizó en Colombia [Pedraza,8], durante esta se añadió equipo de radiofrecuencia

con el fin de obtener mejores muestras. En 2013 un estudio realizado en Brasil midió la ocupación en la ciudad de Rio de Janeiro [de Lima,4], dentro de este estudio también se preparó un algoritmo que simula el DC en el rango de mediciones. Ese mismo año se reportó la primera campaña de medición espectral en México, esta se midió en la ciudad de San Luis Potosí [Aguilar,1], durante esta se usó una antena direccional que era direccionada manualmente a los cuatro puntos cardinales.

En este artículo se busca complementar trabajos realizados anteriormente, haciendo uso de diversas técnicas que mejoren la toma y procesamiento de las muestras. En este se describe la metodología usada para obtener el DC de diversas bandas usando tres distintos umbrales de decisión, los resultados muestran que el DC de cada banda varía en relación con el umbral de decisión utilizado y el tipo de servicio ofrecido.

## **2. Métodos**

Como se vio en la sección 1, la totalidad del espectro radioeléctrico está dividido en bandas que son asignadas para ser usadas en distintos servicios, un gran número de estas bandas están licitadas a empresas que se encargan de ofrecer servicios de telecomunicaciones a los usuarios finales, estas empresas pagan grandes cantidades de dinero por hacer uso de una porción del espectro. Las bandas restantes están asignadas para usos gubernamentales, meteorológicos, industriales y científicos.

Este trabajo se centra en 5 bandas las cuales se encuentran asignadas para la prestación de servicios de radiodifusión y telefonía móvil, además de la banda de uso libre ISM en 2.4 GHz. A continuación, se presentan tres secciones donde se describe la metodología utilizada para calcular la ocupación espectral en dichas bandas.

### **Equipo, ubicación y bandas**

El equipo utilizado en este estudio consiste en una antena omnidireccional AOR DA3200 polarizada verticalmente con patrón de radiación horizontal, dicha antena

está fabricada para el rango de frecuencias 35 – 3000 MHz. Esta se conectó con un cable de bajo ruido al analizador de espectro portátil Tektronix RSA306, el cual está especificado para frecuencias hasta 6.2 GHz, este se controla por medio de Matlab desde una laptop, la figura 2 muestra la plataforma de medición espectral. La campaña de medición se realizó en el Laboratorio del Posgrado en Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, el cual se encuentra en la planta superior (tercer piso) del edificio 1 de la Facultad de Ciencias, la ubicación de la medición se observa en el punto azul de la figura 3. Las mediciones fueron tomadas el día 9 de septiembre del 2017, en total se tomaron 10,000 trazas de energía en un periodo de 2 horas por banda.

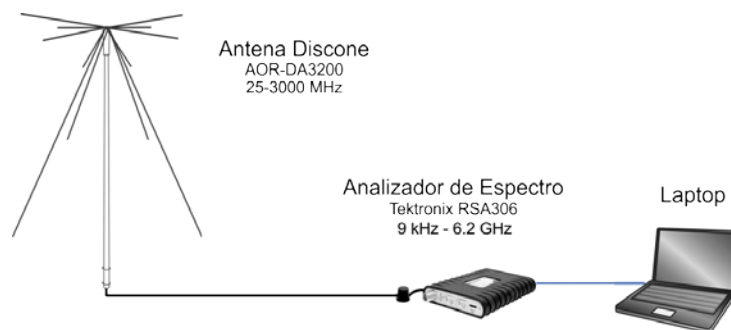


Figura 2 Plataforma de Medición Espectral.

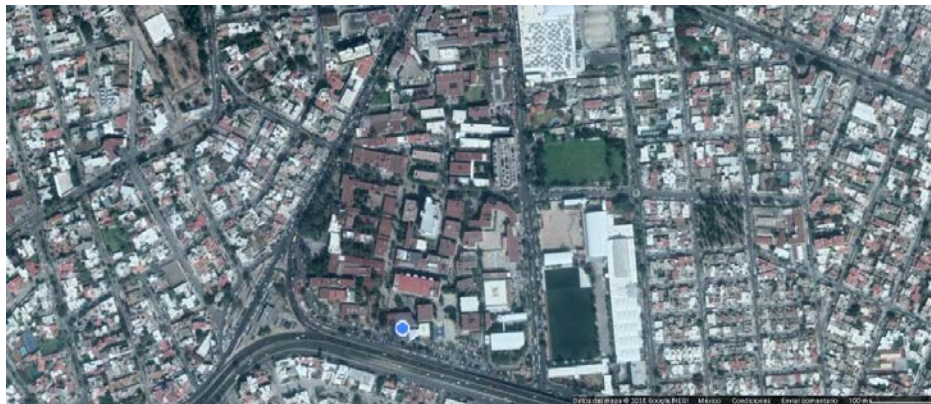


Figura 3 Ubicación de la campaña preliminar (22°8'33.7" N, 101°0'56.89" O).

Las bandas a medir en esta campaña corresponden a las tecnologías más usadas actualmente, se eligieron 5 bandas, 4 de ellas bandas comerciales licitadas por el IFT (radiodifusión FM, televisión digital terrestre (TDT), telefonía móvil GSM 900 y

GSM 1900) y la banda libre de uso Industrial, Científico y Médico (ISM por sus siglas en inglés) de 2.4 GHz, las propiedades de estas bandas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Bandas consideradas en la campaña.

Frecuencia (MHz)	Ancho de Banda	Uso
85 – 110	25	Radio Comercial FM
480 – 600	120	Televisión Digital Terrestre
824 – 894	70	Telefonía Móvil (GSM 900)
1850 -1990	140	Telefonía Móvil (GSM 1900)
2400 - 2500	100	ISM (2.4 GHz)

### Ciclo de trabajo (DC)

Como se mencionó en la sección 1, el DC nos indica el porcentaje de tiempo que una señal se encuentra activa durante cierto periodo. Calcular este parámetro permitiría ubicar las bandas de mayor uso en cierto lugar, así como identificar bandas en las que es posible hacer uso de tecnologías de acceso dinámico al espectro [López,6].

El DC se calcula mediante la sumatoria del número de muestras de energía que se encuentren por encima de cierto umbral de decisión. Sea  $X(f)$  un vector con  $N_t$  niveles de energía correspondientes a las muestras tomadas en cierta frecuencia,  $\Omega$  un vector de la forma expresada en la ecuación 1 y sea  $\gamma$  el umbral de decisión utilizado, el DC para cierta frecuencia se define en la ecuación 2. El DC promedio (ecuación 3) indica el porcentaje de ocupación de todo el rango de frecuencias y se calcula expandiendo la ecuación 2 para todo el número de puntos de frecuencia  $N_f$ .

$$\Omega = \begin{cases} 0 & \text{si } x_i(f) \leq \gamma \\ 1 & \text{si } x_i(f) > \gamma \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, N_t \quad (1)$$

$$DC = \frac{\sum_{i=1}^{N_t} \Omega_i}{N_t} \quad (2)$$

$$DC \text{ Promedio} = \sum_{j=1}^{N_f} \frac{DC_j}{N_f} \quad j = 1, 2, \dots, N_f \quad (3)$$



El umbral de decisión  $\gamma$  es el parámetro más importante a la hora de calcular el DC, ya que un valor muy bajo de este puede provocar que se sobrestime el porcentaje de ocupación, mientras que un valor muy alto ocasionará que se subestime. Por esta razón se han propuesto diversos umbrales con el fin de estimar la ocupación espectral [López,6]. Todos estos se basan en el método de detección de energía ya que este no requiere saber propiedades de las señales a analizar, solamente conociendo el nivel de ruido del aparato de medición y las propiedades de las muestras de energía es posible calcular los diferentes umbrales de decisión:

- **Máximo Ruido:** Este método se basa en tomar la mayor muestra de potencia de ruido obtenida en el analizador (ecuación 3), la principal desventaja de este es que algunas muestras de ruido pueden elevarse muy por encima del promedio de ruido, esto significa que se estaría subestimando la ocupación espectral; sin embargo, este método asegura que ninguna muestra de ruido sea tomada como señal activa, lo que es igual a una falsa alarma del 0 %, tal y como se expresa en la ecuación 4.

$$\gamma(f) = x_{\max}(f) \quad (4)$$

- **m-dBm:** Hasta ahora este es el método más utilizado para definir el umbral de decisión, este se fija calculando el promedio del nivel de ruido del aparato de medición y aumentando cierta cantidad (m) de decibeles por encima de este (ecuación 5).

$$\gamma(f) = x_{\text{prom}} + m \quad (5)$$

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés de International Telegraph Union) recomienda el uso de 6 dBm para frecuencias menores a 400 MHz y 10 dBm para frecuencias mayores [Aguilar,1]. Se ha calculado que 5 dBm por encima del ruido promedio de fondo corresponden a una probabilidad de falsa alarma de 1.2 % [Chiang ,3]; sin embargo, ya que la distribución del ruido de fondo varía entre analizadores de espectro es necesario hacer un análisis de la probabilidad de falsa alarma correspondiente para cada aparato. A diferencia de la ecuación

4, este tipo de umbral puede detectar señales débiles que caigan por debajo del máximo ruido del sistema.

- **Probabilidad de Falsa Alarma (PFA):** Propuesto inicialmente en [López,7], este se basa en la probabilidad de que un canal sea declarado como ocupado cuando en realidad no está siendo usado. Sean  $N(f)$  las muestras de potencia de ruido, y tomando una probabilidad de falsa alarma igual a  $P_{fa}$ , el umbral de decisión  $\gamma(f)$  en cada punto de frecuencia  $f$  se fija de tal manera que solo la fracción de muestras correspondientes a  $P_{fa}$  de  $N(f)$  esten por encima del umbral (ecuación 6), donde  $F_{N(f)}^{-1}$  representa la inversa de la función de probabilidad acumulada  $F_{N(f)}$ . Este umbral se puede tomar como un punto intermedio entre la ecuación 3 en el cual nunca se sobre estima la ocupación y la ecuación 5 en el que las señales pueden ser sobrestimadas o subestimadas, en este se garantiza que el máximo nivel de sobrestimación sea igual a  $P_{fa}$ .

$$\gamma(f) = F_{N(f)}^{-1}(1 - P_{fa}) \quad (6)$$

Para medir el ruido de fondo se reemplaza la antena por una carga que tenga un valor de impedancia igual a la impedancia característica del analizador, normalmente con valor de  $50\Omega$ , posteriormente se toman muestras con el fin de obtener las propiedades del ruido para ser usadas en el cálculo del umbral, entre mayor sea el número de muestras mayor será la precisión del umbral de decisión. La figura 4 muestra una comparativa entre los umbrales antes mencionados.

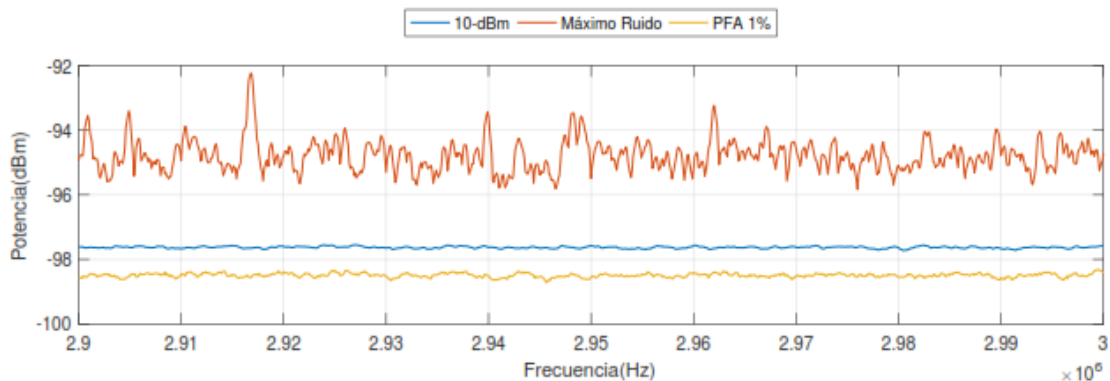


Figura 4 Comparación entre los umbrales propuestos.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos para los tres umbrales antes mencionados, para el tercero se usó una probabilidad de falsa alarma del 1%. Dicho umbral se calculó utilizando 20,000 muestras de ruido para cada banda.

### Procesamiento de los datos

Es necesario configurar el analizador de espectro con diversos parámetros requeridos para la toma de muestras, los más importantes son resolución de ancho de banda, tipo de detector y puntos por barrido. El ancho de banda de resolución utilizado fue de 1 kHz, este indica el menor ancho de banda que el analizador es capaz de percibir. El tipo de detector utilizado fue “+peak”, el cual guarda la mayor potencia recibida en cada rango. Se utilizaron 1001 puntos por barrido ( $N_f$ ), lo que representa la longitud del vector guardado en la computadora, los datos son guardados directamente en un archivo de valores separados por coma (csv).

En total se guardaron 10,000 archivos csv ( $N_t$ ) por banda, cada uno de estos representa la densidad de potencia espectral tomada en cierto momento de la medición.

El conjunto de muestras de densidad espectral de potencia correspondientes a cierta banda puede ser representado como una matriz  $\mathbf{M}$  (6), de  $N_t \times N_f$  mediante la ecuación 7.

$$\mathbf{M} = [\mathbf{M}(t_i, f_j)] \quad (7)$$

Donde cada elemento  $\mathbf{M}(t_i, f_j)$  representa la muestra de densidad espectral de potencia tomada en el instante  $t_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N_t$ ) y en el punto de frecuencia  $f_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N_f$ ). Aplicando la ecuación 2 a cada fila y usando la ecuación 4 para el vector resultante, obtenemos el DC promedio de toda la banda.

En este trabajo se calculó el DC para los tres umbrales de decisión propuestos, de acuerdo con lo visto en la Sección 2.2. Para determinar que el valor de falsa alarma corresponda al error en el porcentaje de ocupación, se calculó el DC de la banda de 2.9-3 GHz la cual se encuentra asignada a radionavegación [IFT,5] y se

espera tenga casi nula actividad espectral. Los resultados muestran que, usando este umbral, el DC aumenta en razón a el porcentaje de falsa alarma (figura 5).

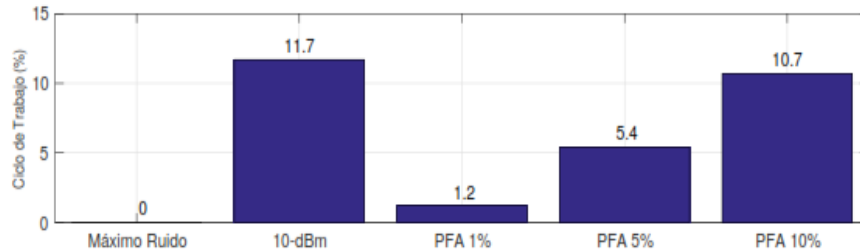


Figura 5 Ciclo de Trabajo en banda con baja ocupación espectral (2.9-3 GHz).

### 3. Resultados

La ocupación espectral de las distintas bandas fue tomada por periodos de dos horas, teniendo un total de 10,000 trazas. Con el fin de mostrar la diferencia entre los diferentes valores de potencia registrados durante la campaña, en la figura 6 se muestra el nivel máximo, el promedio y el mínimo de las 10,000 muestras tomadas por banda. En esta gráfica se observa que, en las bandas asignadas a FM, TDT y telefonía móvil, presentan señales con niveles de potencia promedio superiores a el resto de la banda.

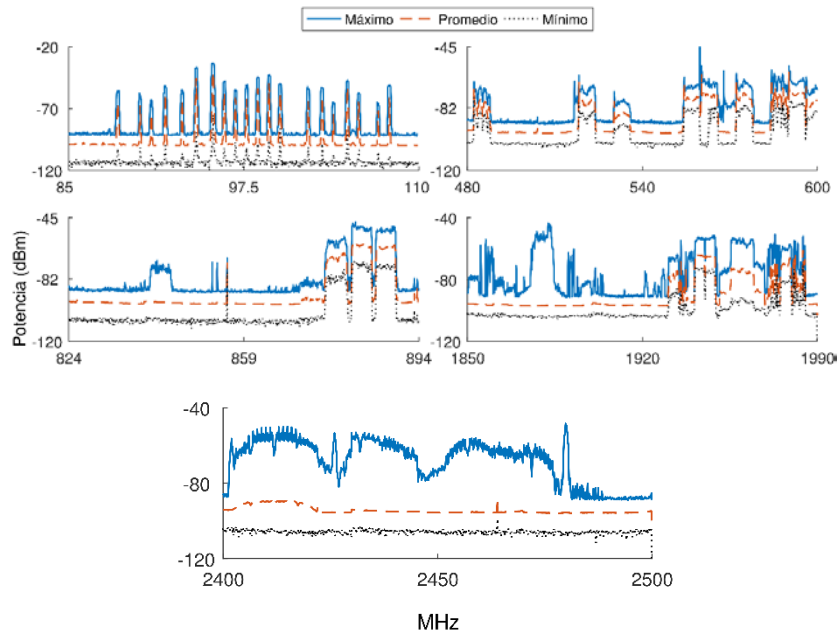


Figura 6 Niveles de potencia para cada una de las bandas.

La figura 7 muestra la ocupación en las 5 bandas durante el periodo de la medición, los puntos blancos representan cuando la banda se consideró ocupada. Dicha gráfica considero solo el DC calculado con la probabilidad de falsa alarma del 1%. Los resultados muestran que, en las bandas asignadas a FM, TDT y telefonía móvil presentan canales con actividad constante, sin embargo, fuera de estos el espectro se encuentra libre todo el tiempo. Por el contrario, la banda de ISM en 2.4 GHz presenta puntos negros en toda la banda, lo que representa que existen señales en todo el rango.

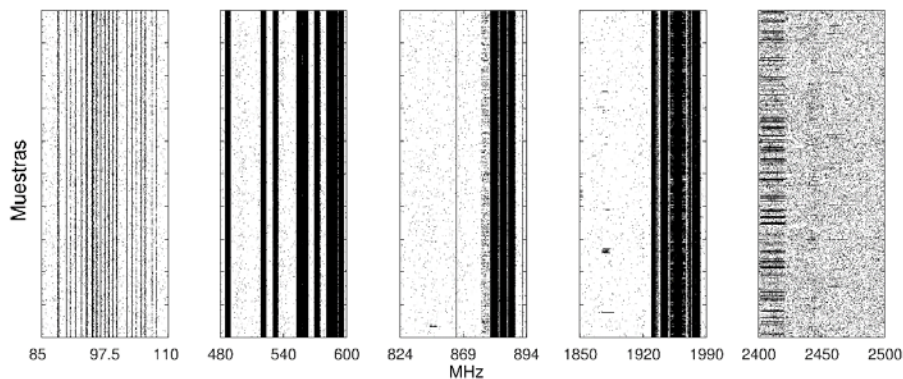


Figura 7 Evolución del DC con respecto a las muestras para cada una de las bandas.

Por último, la tabla 3 muestra el valor de DC Promedio para las cinco bandas de estudio, en esta se nota que la ocupación en cada banda depende del tipo de servicio ofrecido.

Tabla 3 DC de las distintas bandas.

Banda	Máximo Ruido	m-dBm	PFA (1%)
FM	12.8	15.7	16
TDT	41.3	41.3	42.8
GSM 900	18.6	19.4	20.9
GSM 1900	31.3	31.5	34.1
ISM (2.4)	7.2	7.8	22.3

Dado que el servicio de TDT tiene más espectro asignado, este presenta mayores DC promedio que las demás bandas. También las bandas de GSM presentan

ocupación considerable, esto debido a que ciertas bandas dentro del rango se mantuvieron activas durante todo el periodo de medición. A pesar de que las estaciones de FM se mantuvieron constantes durante todo el periodo de mediciones, esta banda presenta DC Promedio entre 12.8 y 16%, esto debido a que existen grandes espacios entre frecuencias. Por último, la banda de ISM en 2.4 GHz presentó la menor ocupación, utilizando los umbrales de máximo ruido y m-dBm. Por otro lado, con el umbral de PFA la ocupación aumento en 15.1%, siendo la banda que mayor diferencia presenta entre umbrales, esto se debe a diferencia de las otras bandas, en esta las señales son de menor potencia, lo que ocasiona que las muestras se encuentren más cerca del umbral de decisión.

#### **4. Discusión**

Basándonos en la sección anterior se puede distinguir que de las 5 bandas existen 4 que presentan canales con potencia promedio y DC promedio superiores al resto. En el caso de radio FM y TDT que son servicios de radiodifusión, dichos canales son destinados a proveer servicios de audio y video usando un tipo de transmisión *simplex* (unidireccional), en la que el receptor solo recibe la señal sin enviar nada de vuelta. Por otro lado, las bandas designadas a telefonía móvil utilizan transmisión *full dúplex* (ida y vuelta), en estas bandas se observa gran diferencia entre los canales de subida (824-849 MHz, 1850-1910 MHz) y de bajada (936-960 MHz, 1930-1990 MHz), esto se debe a que las señales generadas en los dispositivos celulares (subida) son más débiles que las enviadas por las estaciones base (bajada) y por tanto nuestra plataforma es incapaz de detectarlas. Para el caso de la banda ISM en 2.4 GHz, los resultados muestran que tanto la potencia como el DC varían en relación al instante de la medición, esto se debe a que ciertos estándares que usan la banda emiten energía solo cuando lo requieren, como es el caso de WiFi.

#### **5. Conclusiones**

En este trabajo se presentó un estudio de la ocupación espectral en distintas bandas asignadas a distintos servicios. Los resultados presentados muestran que

la ocupación espectral depende directamente del tipo de servicio ofrecido. En el caso de servicios de radiodifusión la ocupación depende del número de canales asignados a la prestación de estos servicios. Por esta razón el DC promedio de estas bandas puede cambiar dependiendo del lugar de medición.

La ocupación en bandas de telefonía móvil depende del tipo de canal medido, en el caso de canales de bajada la ocupación es del 100%, mientras que los canales de subida presentaron ocupación casi nula. Para la banda de 2.4 GHz los resultados fueron diferentes, ya que la potencia indica actividad en toda la banda, sin embargo, ya que esta solo se mantiene durante pequeños periodos de tiempo, el DC promedio es menor a otras bandas.

Por último, se notó que los diferentes umbrales de decisión afectan el cálculo del DC promedio, ya que los resultados difieren para todos los casos, siendo el de máximo ruido el que menores porcentajes aporta, sobre todo en bandas en las que la potencia promedio es más débil.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Aguilar, R., Cardenas, M., Pineda, U. & Stevens, E. Spectrum Occupancy Measurements below 1 GHz in the City of San Luis Potosi, Mexico. 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference, p. 1-5, Las Vegas, 2013.
- [2] Al-Hourani, A., Trajkovi, V. & Kandeepan, S. Spectrum occupancy measurements for different urban environments. 2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), p. 97-102, Paris, 2015.
- [3] Chiang, R., Rowe, G. & Sowerby, K. A Quantitative Analysis of Spectral Occupancy Measurements for Cognitive Radio. 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference, p. 3016-3020, Dublin, 2007.
- [4] De Lima, M. & Mello, L. Cognitive radio simulation based on spectrum occupancy measurements at one site in Brazil 2013 International Microwave & Optoelectronics Conference, p.1-5, Rio de Janeiro, 2013.
- [5] Instituto Federal de Telecomunicaciones, Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF), <http://cnaf.ift.org.mx>.

- [6] López, M. & Casadevall, F. Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio. 2009 European Wireless Conference, p. 199-204, Aalborg, 2009.
- [7] Lopez, M., Umbert, A. & Casadevall, F. Evaluation of Spectrum Occupancy in Spain for Cognitive Radio Applications, IEEE 69th Vehicular Technology Conference, p. 1-5, Barcelona, 2009.
- [8] Pedraza, L., Molina, A. & Paez, I. Spectrum occupancy statistics in Bogota Colombia 2013 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, p. 1-6, Medellin, 2013.
- [9] Petrin, A. & Steffes, P. Analysis and Comparison of Spectrum Measurements performed in Urban and Rural Areas to Determine the Total Amount of Spectrum Usage. Radio Spectrum Engineering Lab, 2005.
- [10] Sanders, F. Broadband spectrum surveys in Denver, CO, San Diego, CA, and Los Angeles, CA: methodology, analysis, and comparative results. 1998 IEEE EMC Symposium. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record, p. 988-993, Denver, 1998.



# **USO DE APLICACIONES DE LA WEB 2.0 PARA LA EVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO**

## *USE OF WEB 2.0 APPLICATIONS FOR THE EVALUATION OF SIGNIFICANT LEARNING*

***Oralia Arriaga Nabor***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*oralia@uan.edu.mx*

***María Palmira González Villegas***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*palmira.gonzalez@uan.edu.mx*

***Alma Cristina Ramírez Covarrubias***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*alma.ramirez@uan.edu.mx*

***Adalberto Iriarte Solís***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*adalberto.iriarte@uan.edu.mx*

***Luis Anibal López Arciniega***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*anibal@uan.edu.mx*

***Agustín Leopoldo Arciniega Luna***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*arciniegl@uan.edu.mx*

## **Resumen**

Ante las tendencias tecnológicas y las opciones que brindan las aplicaciones de la Web 2.0 para múltiples dispositivos, se aspira estudiar, si las herramientas de la Web 2.0 incrementan el aprendizaje significativo, contribuyendo a potenciar el rendimiento académico, se utilizaron las Apps Kahoot!, Socrative, Drive y Formularios de la Suite de Google. La investigación es cuantitativa, tipo correlacional y diseño cuasi experimental. Los resultados obtenidos muestran; un incremento en el aprovechamiento de un 9.83%, detectando una mejora en el logro de las competencias establecidas en la unidad de aprendizaje de Tecnologías de la Comunicación y Gestión de Información, a la par se estudiaron aspectos

pedagógicos y técnicos de las Apps utilizadas, los resultados prueban que 100% de los estudiantes opinaron de Muy buena (50%) a buena (50%) su evaluación educativa con las aplicaciones implementadas, apoyando la ventaja de utilizar herramientas de la web 2.0 para la evaluación del aprendizaje significativo.

**Palabras Claves:** Aplicaciones Web 2.0, aprendizaje significativo, evaluación.

## **Abstract**

*Given the technological trends and the options offered by Web 2.0 applications for multiple devices, we aspire to study, if Web 2.0 tools increase meaningful learning, contributing to enhance academic performance, Kahoot! Socrative Apps were used, Drive and Forms of the Google Suite. The research is quantitative, correlational type and quasi-experimental design. The results obtained show; an increase in the use of 9.83%, detecting an improvement in the achievement of the competences established in the Learning Unit of Communication Technologies and Information Management, at the same time pedagogical and technical aspects of the Apps used were studied. results prove that 100% of students rated Very good (50%) as good (50%) their educational evaluation with the applications implemented, supporting the advantage of using Web 2.0 tools for the evaluation of meaningful learning.*

**Keywords:** Evaluation, Meaningful learning, Web 2.0 applications.

## **1. Introducción**

Las herramientas que se pueden obtener hoy en día en la World Wide Web (Web) 2.0, permiten la implementación de la tecnología educativa en el aula de una manera más fácil y sencilla, representando una opción para incorporar otros recursos metodológicos en el proceso de evaluación del aprendizaje significativo.

La Web 2.0 ha puesto a disposición de los docentes y estudiantes un sinnúmero de aplicaciones (Apps) de libre acceso que contribuyen de forma sencilla la interacción docente-estudiante estudiante-docente. La tecnología educativa es resultado de combinar la educación -a través de la cual se desarrolla el intelecto del ser humano- y la tecnología, que hoy en día tiene un gran impacto en la vida diaria. La comunidad científica ha fomentado la propagación de aplicaciones y programas de software

para el aprendizaje en la Web 2.0 destacando entre ellas las aplicaciones de comunicación [Cela, Fuentes, Alonso y Sánchez, 2010].

El objetivo de la presente investigación es estudiar si las aplicaciones de la Web 2.0 son una herramienta que favorece el proceso de evaluación del aprendizaje significativo y al mismo tiempo contribuyen a potenciar el rendimiento académico, utilizando para ello Apps lúdicas como Kahoot!, Socrative, además de las herramientas inteligentes de la Suite de Google Drive y Formularios. Estas últimas permiten jugar con una serie de factores que propician de forma divertida, la participación, el trabajo en equipo, la investigación y otros elementos que coadyuvan en la generación del aprendizaje en los estudiantes de la asignatura de Tecnologías de la Comunicación y Gestión de la Información (TCGI) en la Universidad Autónoma de Nayarit (UAN).

### **Conceptualización**

El concepto de Web 2.0 surge como resultado de una lluvia de ideas entre los equipos de O'Reilly y MediaLive Internacional y representa la segunda generación de aplicaciones nuevas e interesantes basadas en siete principios básicos: 1. La Web como plataforma, 2. Uso del talento colectivo, 3. Uso y reutilización de sus bases de datos, 4. Actualización continua, 5. Modelos de programación ligera y simple, 6. Desarrollo de software para múltiples dispositivos y 7. Prácticas productivas de los usuarios, [O'Reilly, 2005]. Recapitulando se puede decir, que la Web 2.0 es la transformación e innovación de las aplicaciones que se brindan a través de su plataforma. Desde el enfoque del proceso cognitivo por Piaget y Vygotsky el aprendizaje significativo es un concepto de análisis constante a corto, mediano y largo plazo. Para Piaget el conocimiento es aplicación, aprovechamiento y acercamiento, mientras Vygotsky coloca en primer lugar la participación y apropiación del adulto en la cultura adquirida desde su niñez. Sin embargo, partiendo de lo dicho por los teóricos, el aprendizaje significativo manifiesta el objetivo del pensamiento, su transformación y la forma en que a través de la didáctica se genera de manera permanente en el estudiante. Se aprende mejor lo que está relacionado a la vida a lo que es ajeno, [Vergnaud, 2016].

Considerando esta perspectiva, se puede decir que, el aprendizaje significativo se da en el aula a partir de la implementación de modelos que propicien que el estudiante se involucre en el aprendizaje a través de sus vivencias, mientras el docente lo apoya en diferentes problemáticas y con preguntas significativas que favorezca el proceso educativo del alumno, con modelos de enseñanza aprendizaje participativos, material didáctico innovador basados en aspectos cognoscitivos y afectivos.

### **Apps de la Web 2.0, su enfoque cognitivista y constructivista**

El uso de las aplicaciones que se ofrecen a través de la Web 2.0 en algunas de las actividades del aula como una opción en el proceso de enseñanza aprendizaje, es un desafío para el docente quien deberá identificar en base a las tendencias educativas un modelo pedagógico, con el uso de las tecnologías de información y comunicación (TIC) que le permita alcanzar el aprendizaje significativo.

Una tendencia pedagógica actual es el cognoscitismo, esta se basa en el estudio de las diferentes características psicológicas que forman parte de la realidad objetiva, que conducen a la generación del conocimiento. Los estudiantes adquieren un aprendizaje significativo cuando interactúan con su entorno, incrementando con ello sus opciones de asimilar y de llevar el aprendizaje a otros escenarios. Las bases fundamentales para su formación con apoyo de herramientas de la Web 2.0 son:

- El uso de Apps videos, gráficas, fotografías, entre otros, estimulan al estudiante mejorando el aprendizaje significativo.
- Organizar y diseñar los contenidos definidos en el programa de manera progresiva y lógica, favorece el aprendizaje.
- Paralelamente, se debe utilizar actividades con recursos que den respuestas inmediatas, y otras, al ritmo de los estudiantes, [Ahumada-Torres. 2012].

El modelo de la Web 2.0 integra todas las características del constructivismo convirtiéndolo en un espacio más interactivo, impulsando el trabajo colaborativo y contemplando el entorno social en donde se comparten las experiencias y los conocimientos de cada uno [García, 2014].

La Web 2.0 está sustentada en el modelo constructivista del aprendizaje, brindando con ello ventajas que se pueden incorporar al quehacer docente, con el fin de promover el aprendizaje con actividades que fomenten la construcción del conocimiento en el estudiante [Vila, 2015].

El constructivismo ve el aprendizaje como un proceso de construcción del conocimiento de manera personal, permitiendo con ello el autoaprendizaje; así mismo, potencializa la interacción que se produce con diferentes factores en entornos didácticos, donde el estudiante deberá organizar y transformar la información con sus ideas y conocimientos, haciéndose responsable de su enseñanza comprobando lo aprendido a través de evaluaciones formativas con retroalimentación inmediata, que permita alcanzar el aprendizaje significativo.

### **Evaluación de aprendizajes significativos con el uso de Apps de la Web 2.0**

Desde la experiencia y el trabajo realizado como docente, surge la necesidad de realizar un diagnóstico sobre la implementación de diferentes herramientas de la Web 2.0 en el proceso de enseñanza aprendizaje, que permita mejorar la comunicación (docente-estudiante, estudiante-docente, estudiante-estudiante), propicie la participación, el trabajo en equipo, la investigación y otros elementos que generen el aprendizaje significativo en el estudiante. La inclusión de aplicaciones que apoyen el proceso de formación, seguimiento y retroalimentación debe estar sustentado en un enfoque metodológico, que permita transitar del modelo tradicional centrado en el docente para dar paso a un modelo centrado en el estudiante y su capacidad de autoaprendizaje. Incluir aplicaciones involucra la participación del estudiante de forma sencilla y sin salirse de su contexto, donde lo que más utilizan son sus celulares conectándose a diario a una red social, destacando esta potencialidad el decidir entre las numerosas aplicaciones disponibles en la Web 2.0 no es tarea fácil, sin embargo, para esta investigación se consideró hacer uso de herramientas de acceso gratuito, disponibles para dispositivos móviles que permitan la evaluación del aprendizaje de manera espontánea, divertida y didáctica, además de obtener elementos que permitan reforzar o mejorar las estrategias utilizadas en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

Según Barberà la evaluación nos brinda elementos para identificar si un estudiante tiene o no las competencias sobre un tema en específico. Con todo, la evaluación no solo es sobre los aprendizajes del alumno, la evaluación también aplica para el aprendizaje en sí, teniendo como eje principal la retroalimentación, además, cómo ésta puede ser utilizada por el docente y el estudiante para fortalecer sus debilidades. Implementar herramientas de evaluación de la Web 2.0 es en beneficio de un aprendizaje más significativo.

La evaluación del aprendizaje presenta algunas influencias y efectos:

- La influencia motivacional está relacionada con la tensión que ocasiona en el estudiante al saber que va a ser evaluado.
- Influencia de consolidación es con respecto a la evaluación se debe realizar solo sobre temas vistos en clases.
- Influencia de carácter anticipatorio, que el alumno conozca con anticipación cómo será evaluado, le marcará la pauta para su forma de estudiar o de aprender, [Barberà, 2016].

Las Apps de evaluación pueden ser un instrumento pedagógico relevante, sin embargo, es importante evaluar las herramientas tecnológicas implementadas para la evaluación del aprendizaje y analizar si es posible dar respuesta a algunas de las influencias antes mencionadas, investigar las aportaciones que estas pueden brindar, y justificar el hacer de este proceso una acción formativa continua, sobre todo, que se generen elementos para el aprendizaje significativo.

## **2. Métodos**

La actual investigación se efectuó con una orientación cuantitativa, de tipo correlacional y un diseño cuasi experimental con el propósito de medir el efecto que las aplicaciones de Kahoot, Socrative, así como, Drive y Formulario de la Suite de Google tienen en el proceso de evaluación del aprendizaje significativo y al mismo tiempo, si contribuyen a potenciar el proceso de evaluación en los estudiantes del ciclo escolar 2016-2017 de la unidad de aprendizaje de TCGI en la UAN. La muestra se conformó en base a un grupo de 22 estudiantes previamente formado por la

institución, por lo que no existe proceso probabilístico en la conformación de la misma, es importante señalar que el grupo es de primer semestre y dado que en la institución existe un programa de apoyo adicional para nuevo ingreso, en los siguientes dos meses se incorporaron 5 alumnos más, finalizando el semestre con 27 estudiante. Se aplicaron tres instrumentos de evaluación; pre-prueba, pos-prueba y una encuesta de satisfacción del uso de Apps, todos enfocados a los estudiantes. La pre-prueba se aplicó al inicio del semestre con el propósito de conocer el nivel de conocimiento inicial que con respecto a la unidad de aprendizaje de TCGI tienen los estudiantes. La pos-prueba se aplicó al final del semestre con el fin de obtener el rendimiento académico de los estudiantes, y con los resultados obtenidos en la pre-prueba para medir el avance obtenido por tema vistos en la unidad de aprendizaje. La encuesta de satisfacción del uso de Apps se aplicó al final del semestre con el propósito de conocer el grado de satisfacción de los estudiantes en el uso de las Apps implementadas en la unidad de aprendizaje.

La pre y post prueba se estructuraron en dos secciones: la primera sección para obtener información demográfica y la segunda formada en cinco apartados cada uno de ellos evaluando una determinada competencia:

- Conocimientos del tema, 11 ítems.
- Uso ético y responsable de la información con 4 ítems.
- Evaluación de fuentes de información conformada de 4 ítems.
- Desarrollar, Usar y Revisar Estrategias de Búsqueda con 15 ítems y el apartado.
- Comunicación y aplicación de la información con 6 ítems.

La encuesta de satisfacción del uso de Apps se conformó de dos partes, la primera para obtener datos personales y la segunda con una serie de interrogantes que permitieran conseguir información sobre la impresión del estudiante en aspectos de aprendizaje, habilidades formativas y opiniones sobre la implementación de aplicaciones de la Web 2.0. Se elaboró con quince reactivos, en cinco secciones, la primera para recabar información sobre la Implementación de las Apps con tres ítems de respuesta SI o NO, la segunda parte referente a las aplicaciones Kahoot!,

Socrative, así como, Drive de Google y Formularios de Google, en cada sección se enunciaron tres preguntas utilizando una escala lineal (5=Muy bueno, 4=Bueno, 3=Regular, 2=Malo y 1=Muy malo) con el fin de dar respuesta a los objetivos previstos en la indagación. Los datos obtenidos se trasladaron a una matriz de doble entrada facilitado con ello su exportación al software *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) para su análisis. Los tres instrumentos se aplicaron en línea utilizando la herramienta Formularios de la Suite de Google.

Durante el semestre, se elaboraron recursos didácticos con el uso de las aplicaciones de la Web 2.0 para repasar y evaluar las competencias adquiridas, los resultados obtenidos permitieron tomar acciones de mejora inmediata, reforzando e implementando nuevas estrategias en aquellos temas donde se presentaron deficiencias. Para la evaluación del aprendizaje, al final de cada tema se utilizó Kahoot! (figura 1).

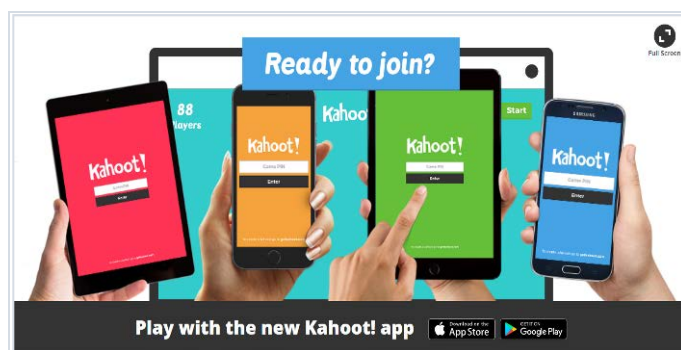


Figura 1 Kahoot aplicación de la Web 2.0.

Es una aplicación gratuita basada en actividades creativas y divertidas con la posibilidad de ser diseñadas sobre cualquier tema y acuerdo a las necesidades del usuario, promueve el aprendizaje colaborativo, funciona en cualquier dispositivo con acceso a internet, brinda opciones para aprender en el aula y fuera de ellas. Maneja dos interfaces, una permite al docente la creación y administración de las actividades (figura 2) y la otra la interacción con el estudiante, [Kahoot Studio, 2017]. Para la evaluación departamental de la unidad de aprendizaje de TCGI, se utilizó la App Socrative (figura 3), versión gratuita con características para la evaluación, creada por Berté, West y Duncan en 2014; maneja opciones para la creación de



bases de datos con preguntas de respuestas cortas, verdadero-falso y opción múltiple a través de cuestionarios, encuestas y concursos divertidos como la carrera del espacio, permitiendo la evaluación de aprendizajes en el estudiante de una forma divertida y relajada. Propicia el trabajo colaborativo y la participación de los estudiantes dentro y fuera del aula, usando cualquier dispositivo que tenga acceso a internet, maneja dos interfaces (figura 4), la primera donde el docente puede crear salas virtuales y la segunda donde el estudiante responde. Brinda resultados inmediatos, generando informes en archivos con extensión xlsx o vía correo electrónico con los que se pueden tomar acciones para replantear las estrategias de enseñanza aprendizaje, [Socrative, 2017].

En cuanto a las actividades de práctica a desarrollar durante el semestre en equipo, se utilizó la herramienta Drive de la Suite de Google (figura 5), con la finalidad de interactuar y retroalimentar con el estudiante.

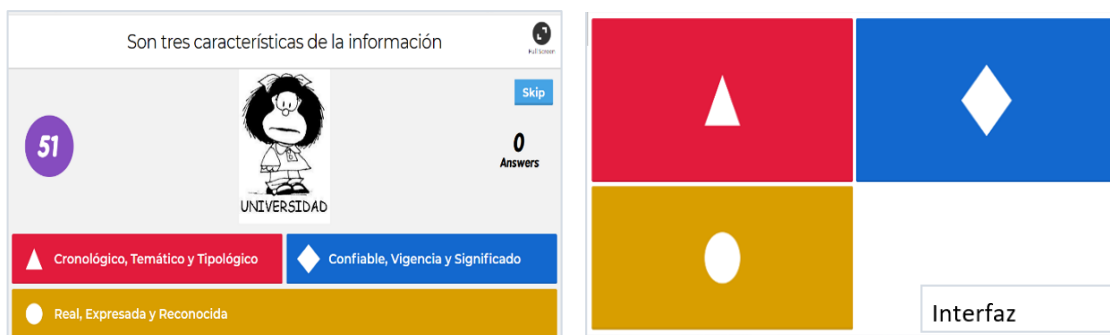


Figura 2 Interfaces en Kahoot!.

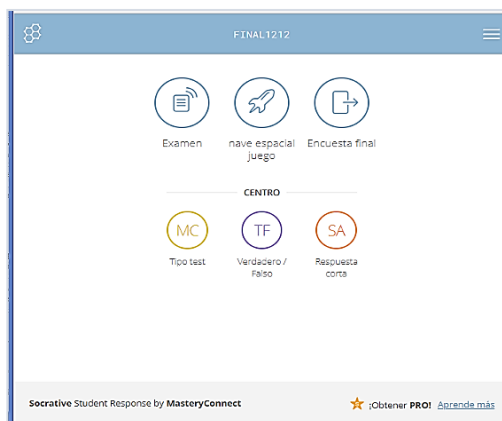


Figura 3 Socrative aplicación de la Web 2.0.

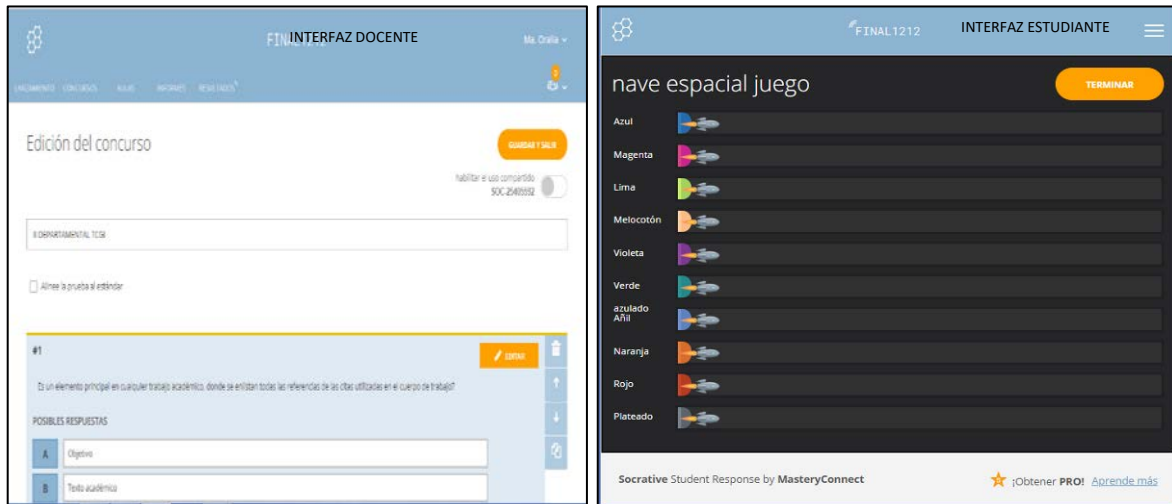


Figura 4 Interfaces en Socrative.

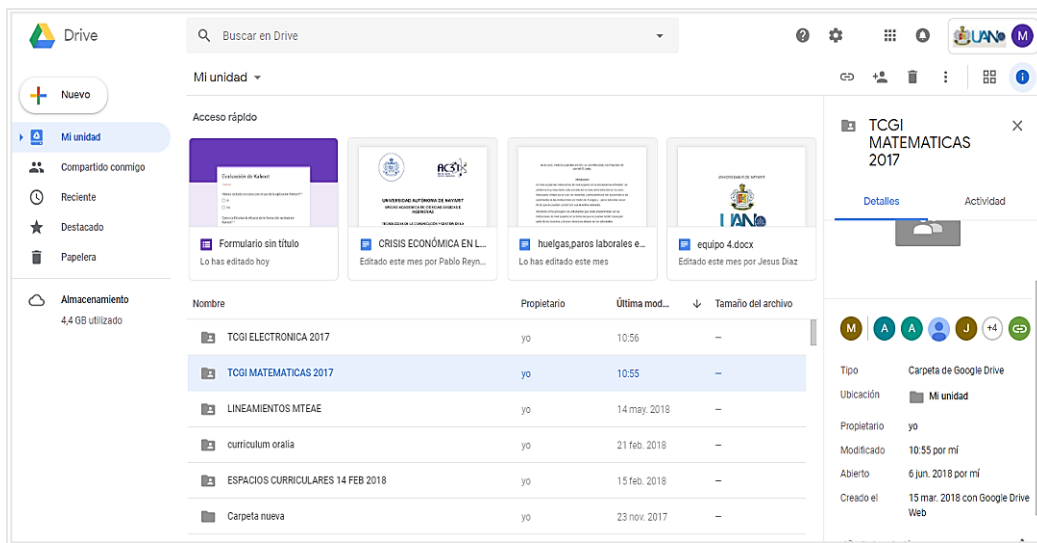


Figura 5 Drive de la Suite de Google pantalla principal.

La App Drive es un espacio de almacenamiento gratuito en la nube, donde se pueden guardar, compartir y colaborar con otros usuarios desde un lugar seguro todo tipo de archivos, -documentos, hojas de cálculo y presentaciones- fomentando el trabajo colaborativo, asignándole la propiedad de un archivo a otra persona (figura 6) para que realice cambios, sugerencias de forma simultánea o en diferentes momentos, siempre con la opción de aportar ideas y enriquecer el documento, teniendo acceso desde cualquier lugar a donde vayas, utilizando uno u otro dispositivo que disponga de internet, [Google Drive, 2018].

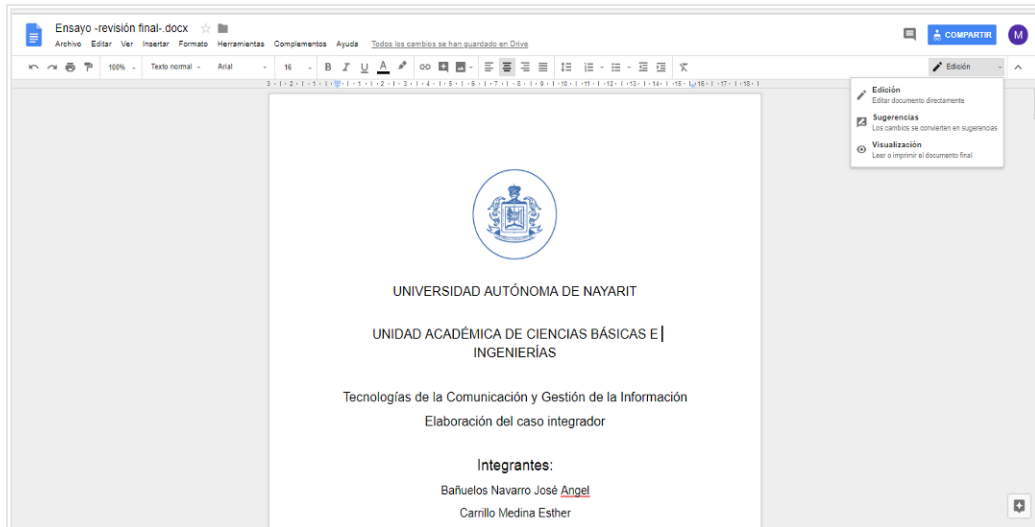


Figura 6 Drive de la Suite de Google pantalla documento compartido.

Para repasar los temas vistos al finalizar cada clase se utilizó el Formulario de la Suite de Google (figura 7).

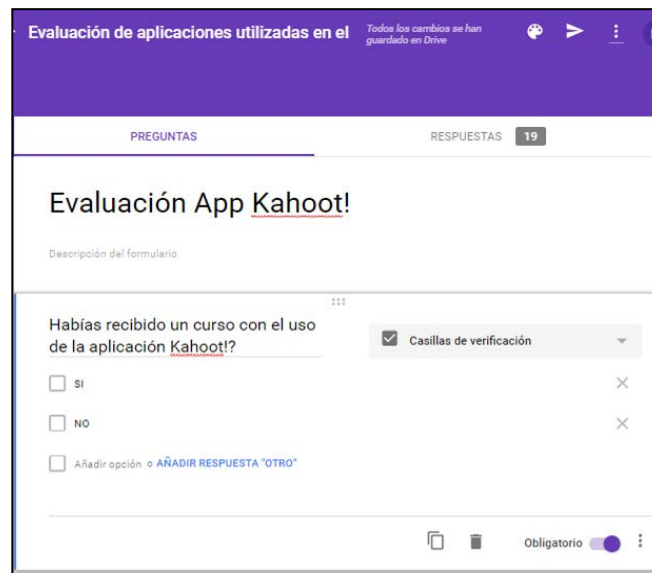


Figura 7 Pantalla de cuestionario.

La App Formulario es una herramienta para la creación de diversas actividades de respuesta inmediata entre ellas se pueden mencionar inscripciones a eventos, aplicación de sondeos rápidos, recopilación de información, se puede agregar un formato personalizado y original o elegir entre los previamente definidos,

implementa diferentes alternativas de preguntas que van desde opción múltiple, listas desplegables, tipo test entre otras, manejando la posibilidad de agregar imágenes y/o videos, respondiendo a ellos desde cualquier ubicación utilizando un medio conectado a internet. Las respuestas se guardan en tiempo real de forma automática, organizada y segura acompañadas de gráficas y generando archivos en Excel, [Formularios Google, 2018].

### 3. Resultados

Durante del ciclo escolar 2016-2017 al iniciar el semestre el grupo muestra estaban constituido por 22 estudiantes, la figura 8 muestra los aspectos generales de: género, estado civil, edad promedio y estatus laboral de quienes aplicaron la encuesta, en ella podemos ver que el 78.26% de los encuestados son del género femenino y el 21.74% restante del masculino, el 96% (21) solteros y el 4% (1) casado, solo un 8% de ellos trabaja lo que representa que el 92% se dedica únicamente a estudiar, finalmente la mayoría de los encuestados está en una edad promedio de 19 años, correspondientes a su nivel académico de estudiantes en el nivel Licenciatura.

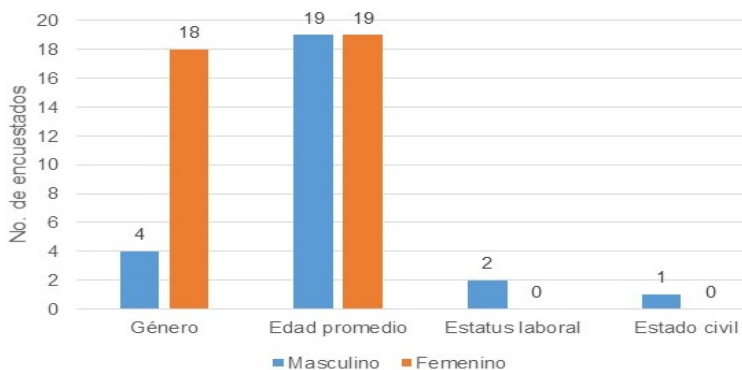


Figura 8 Información general de los estudiantes encuestados.

Los resultados obtenidos al aplicarse el pre-test a 22 estudiantes se muestra en la figura 9, el puntaje obtenido oscila en un rango de 19 a 31 puntos, de un total de 40 puntos, lo que representa un promedio de 24.81 puntos, equivalentes a un 62.02% de aciertos y un 37.97% de errores. Estos datos brindan un punto de partida y al finalizar el semestre serán comparados con los que resulten de aplicar el pos-test.

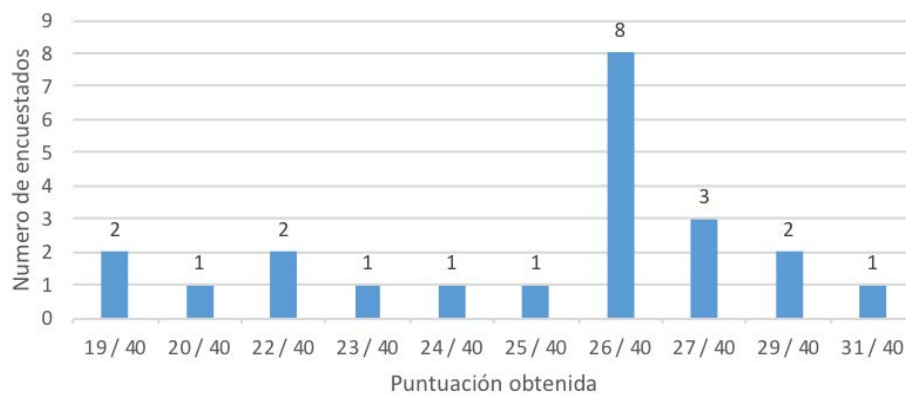


Figura 9 Distribución de los puntajes totales por estudiante pre-test.

Al aplicar el pos-test a 27 estudiantes los resultados obtenidos oscilaron entre 28 a 35 puntos, de un total de 40 puntos, como se puede ver en la figura 10, lo que representa un promedio de 30.19 puntos, equivalente a una calificación de 75.47%. Es importante señalar que al iniciar el semestre solo se contaba con 22 estudiantes y en el transcurso del mismo se fueron incorporando cinco más, justificando con ello el incremento del tamaño de la muestra a 27 alumnos al finalizar el semestre.

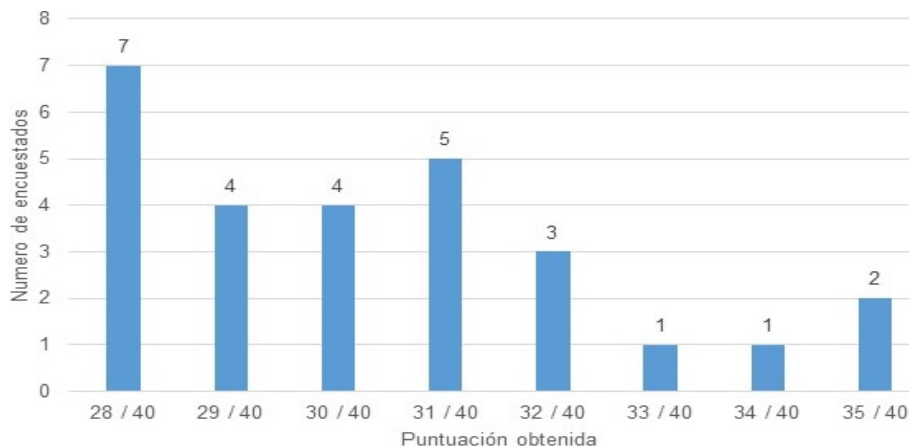


Figura 10 Distribución de los puntajes totales por estudiante pos-test.

La tabla 1, muestra los aciertos obtenidos antes de ver los contenidos temáticos de la unidad de aprendizaje de TCGI, al iniciar el semestre se aplicó el pre-test, donde se alcanzó un total de 552 aciertos, mostrando claramente un incremento en aciertos al aplicar el pos-test y una vez que se vieron todos los contenidos de la unidad de aprendizaje, donde se lograron un total de 820 aciertos.

Tabla 1 Aciertos del pre-test y el pos-test en cada uno de los temas TCGI.

<b>Temas de la Unidad de Aprendizaje</b>	<b>Aciertos en Pre-test</b>	<b>Aciertos en Pos-test</b>
Conocimientos del tema: Alfabetización Informacional	214	264
Uso ético y responsable de la información	59	89
Evaluación de fuentes de información	54	86
Desarrollar, Usar y Revisar Estrategias de Búsqueda	173	269
Comunicación y aplicación de la información	52	112
<b>Total de Aciertos</b>	<b>552</b>	<b>820</b>

Los resultados de aplicar la encuesta de satisfacción del uso de Apps, al preguntar a los estudiantes si en alguna ocasión había utilizado una de las siguientes aplicaciones; Kahoot!, Socrative así como, Drive y Formulario de la Suite de Google, el 100% respondió negativamente, estableciendo con el resultado obtenido la necesidad de implementar una capacitación en el uso y administración de cada una de las aplicaciones mencionadas antes de iniciar los temas contenidos en la unidad de aprendizaje. Del mismo modo, la respuesta a la pregunta: Te gustaría que se incorporaran aplicaciones de la Web 2.0 en otras Unidades de Aprendizaje?, el 100% de los estudiantes respondió afirmativamente. Finalmente, y considerando un inconveniente al preguntar a los encuestados: ¿Los recursos tecnológicos en tu Unidad Académica son suficientes?, el 100% respondió negativamente, ya que los laboratorios de cómputo cuentan con pocos equipos, la mayoría son obsoletos, aunado al factor servicio de internet donde refirieron una mala o casi nula señal en el aula, solventando estos inconvenientes con el uso de equipos propios de los estudiantes –tablet, laptop, smartphone, entre otros dispositivos móviles- y de un access point del docente para distribuir el servicio de internet desde una posición alámbrica de acceso a internet o de su celular, además de aquellos equipos de los estudiantes que contaban con acceso a internet. Es significativo mencionar que hoy en día cerca del 97% de estudiantes y docentes disponen de dispositivo inteligente [Organista, 2013]. Lo anterior, permitió el desarrollo de las actividades programadas y el aprovechamiento de las bondades de las aplicaciones implementadas para la evaluación del aprendizaje.

En la figura 11, se aprecia que, del total de encuestas aplicadas, el 100% de los estudiantes calificaron de Muy fácil usar las aplicaciones Kahoot! y Socrative. El

81% calificó de Muy fácil usar los Formularios de Google, mientras que el 19% restante lo consideró Fácil, el valor promedio es de 4.81 y muestra una tendencia hacia el criterio Muy fácil de la escala aplicada. Con respecto al uso de la App Drive de Google se observa que la mayoría de las respuestas fueron de Muy fácil a Fácil representando en 51.85% y 48.15% respectivamente y donde el valor promedio de 4.51 señala una tendencia media entre ambos valores de la escala lineal. Estos resultados son concluyentes para determinar, que los estudiantes no enfrentaron problemas relevantes al momento de usar las aplicaciones, logrando hacer el 100% de las actividades programadas en la unidad de aprendizaje con el uso de las Apps.

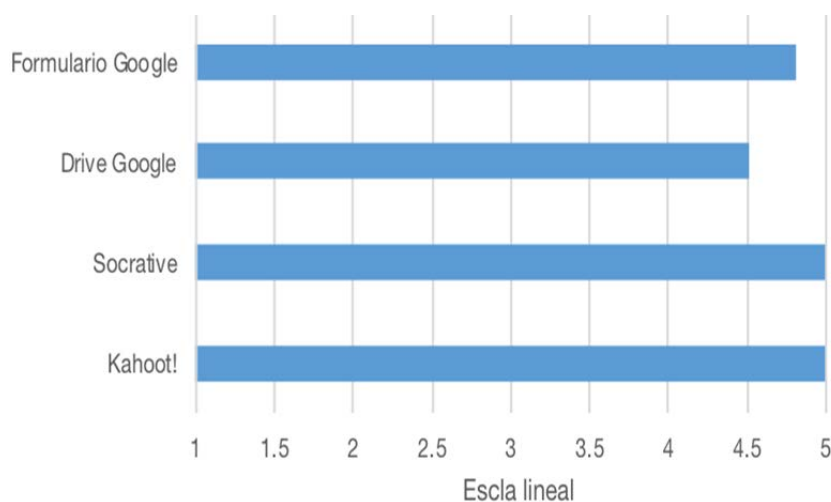


Figura 11 Valores promedio del uso de Apps de la Web 2.0.

La figura 12, muestra que los 27 encuestados calificaron como Muy buenas las evaluaciones aplicadas con las Apps Kahoot! y Socrative, mientras que para el Formulario y Drive de Google las consideraron de acuerdo a los valores promedio de 4.55 entre Buenas el 50% y Muy buenas 50%, a lo que algunos estudiantes expresaron complicaciones en el manejo de archivos en Drive, ya que cada que abrían sus archivos para editarlos los guardaban y generaban un sinnúmero de versiones, confundiéndolos al seleccionar el archivo con la última actualización para seguir trabajándolo de forma colaborativa, sin embargo, al terminar las actividades programadas con estas apps, se logro corregir esos inconvenientes y usar de manera adecuada la aplicación sin generar copias de los archivos compartidos.

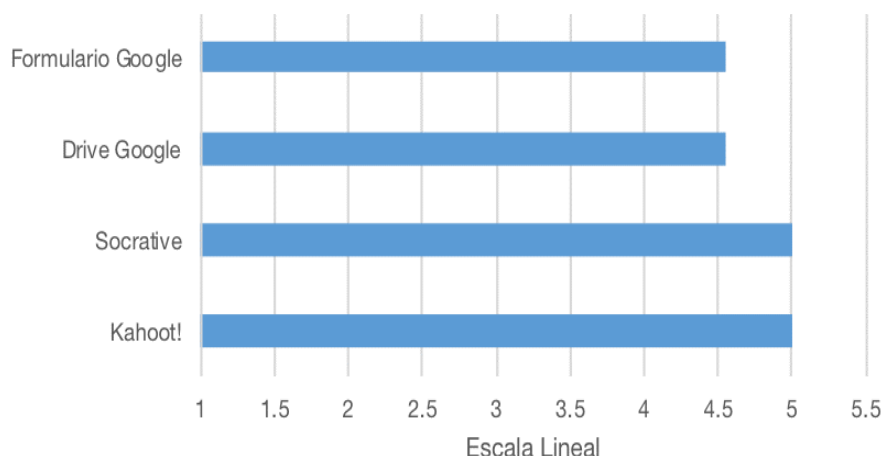


Figura 12 Evaluación sobre el uso de las Apps en el proceso de aprendizaje.

#### **4. Discusión**

Analizando los resultados obtenidos de aplicar el pre-test, donde se obtuvo un 62.02% de conocimiento sobre los diferentes temas que se expusieron, contra la puntuación del 71.85% del pos-test, se puede ver un incremento en el aprovechamiento de 9.83%, donde se detecta una mejora en el logro de las competencias establecidas en el programa de la unidad de aprendizaje de TCGI, comprobándose en qué grado las Apps como herramienta de evaluación del aprendizaje significativo apoya a potenciar el rendimiento académico. Como referencia, se puede tomar los resultados obtenidos por estudiantes de un periodo anterior, que cursaron la misma unidad de aprendizaje con el mismo docente y sin el uso de las Apps de evaluación, donde en promedio se alcanzó una puntuación de 64.36%. Se puede observar que las Apps bien implementadas, si impactan en el aprendizaje significativo del estudiante.

Así pues, la evaluación del aprendizaje con las aplicaciones de la Web 2.0 en base al trabajo colaborativo no solo mejora el aprovechamiento, sino que incrementa la participación del estudiante, al producirse de manera natural la interacción docente-estudiante con un beneficio mutuo, incrementa la colaboración en todo momento entre los estudiantes, además, permite la oportunidad de evaluar su comportamiento individual y en equipo, [Artero, 2012].

Considerando los resultados obtenidos de aplicar la encuesta de satisfacción del uso de Apps, se observa que las respuestas oscilaron entre Muy bueno y Bueno,



destacando el hecho de que se manejaron actividades con el uso de aplicaciones de la Web 2.0 que involucraran al estudiante con la evaluación del aprendizaje, haciendo innegable que las actividades prácticas de valuación que desarrollaron les permitió alcanzar los objetivos planteados en la unidad de aprendizaje de TCGI. Abreviando se puede decir que el usar las aplicaciones de la Web 2.0 para evaluar el aprendizaje no solo facilitó la retroalimentación entre el docente y el estudiante en tiempo real, permitiendo ajustar y fortalecer las estrategias de enseñanza, trazando una mejor ruta de aprendizaje con tareas innovadoras, motivadoras y formativas, sino que representó la oportunidad de indagar en nuevos escenarios de evaluación.

Los alcances emanados, confirman que el desarrollo de aprendizaje en el estudiante puede ser fortalecido de forma significativa con el uso de herramientas tecnológicas de la Web 2.0, beneficiando el trabajo colectivo, surgiendo con ello la evaluación de la enseñanza de una forma divertida y efectiva, permitiendo cuantificar de manera inmediata el progreso del aprendizaje, [Ahumada, 2012].

## **5. Conclusiones**

Es importante realizar programas de capacitación continua a profesores sobre el uso y la importancia de las diferentes aplicaciones disponibles en la Web 2.0 con el propósito de que implementen estrategias didácticas que transforme su práctica docente. Es necesario que las actividades que se implementen a través de las aplicaciones se apeguen a los contenidos de la unidad de aprendizaje, se cuiden todos los aspectos para lograr resultados positivos y alcanzar el propósito planteado.

Con respecto del nivel de aprendizaje significativo alcanzado con la implementación de herramientas tecnológicas para la evaluación del aprendizaje, es evidente que se puede lograr un incremento en el aprovechamiento, lo anterior basados en el resultado obtenido al aplicar el pre-test de un 62.02% de conocimiento sobre los diferentes temas que se expusieron, contra la puntuación del 71.85% del pos-test, se puede ver un incremento en el aprovechamiento de 9.83% se puede decir, que se mejoró en el logro de las competencias programadas para la unidad de

aprendizaje de TCGI. Resultando importante investigar si factores externos influyen en el logro de las mismas.

Integrar las Apps como herramienta de evaluación del aprendizaje significativo, propició la interacción y retroalimentación, entre el docente y el estudiante, de tal modo, que se reforzaron las deficiencias en tiempo real, fortaleciendo el logro de las competencias. En este sentido, la incorporación de las aplicaciones de la Web 2.0, proporcionó la posibilidad de evaluar la actividad educativa diaria, haciendo énfasis en la reflexión, permitiendo a los estudiantes y al docente trazar una ruta de aprendizaje, y de realizar los ajustes necesarios. Considerando estos resultados, se sugiere la implementación de herramientas tecnológicas educativas en las actividades que se realizan en el aula.

Es importante resaltar que los estudiantes de la muestra referidos en esta investigación y que se trabajaron con las herramientas de la Web 2.0 pertenecen al área de la salud, prevaleciendo en todo momento una gran disponibilidad de su parte por aprender a usarlas y realizar las actividades implementadas durante el semestre. Lo anterior nos da muestra de que los estudiantes requieren una capacitación en el uso de las aplicaciones, misma que debe contemplarse en el contenido de la unidad de aprendizaje a impartir.

En la implementación de estas aplicaciones se detectó una participación muy activa y motivadora por parte de los estudiantes, expresando y demostrando un interés porque se utilicen este tipo de herramientas en otras unidades de aprendizaje.

Finalmente, el trabajo realizado en esta investigación ha demostrado ventajas al implementar herramientas tecnológicas en el proceso de evaluación del aprendizaje, así como la necesidad de fortalecer la capacitación docente en estos temas y la dotación de tecnología adecuada, no obstante, queda mucho trabajo por realizar en esta materia.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Ahumada-Torres, M. E. (2012). Innovando la docencia y la evaluación: las herramientas 2.0 al aula. Sección temática: Innovación en la docencia Universidad de Barcelona, Barcelona, España pp. 15-28

- [2] Artero, B. N. (2011). La interacción como eje de aprendizaje en las redes sociales. <https://www.educaweb.com/noticia/2011/01/31/interaccion-como-eje-aprendizaje-redes-sociales-14570.html>.
- [3] Barberà, E. (2016). Aportaciones de la tecnología a la e-Evaluación. *Revista de Educación a Distancia*, 0(50): <http://revistas.um.es/red/article/view/270811>.
- [4] Cela, K., Fuentes, W., Alonso, C., & Sánchez, F. (2010). Evaluación de Herramientas Web 2.0, estilos de aprendizaje y su aplicación en el ámbito educativo. *Journal of Learning Styles*, 3(5).
- [5] Formularios de Google: crea y analiza encuestas de forma gratuita (2018). [https://www.google.com/intl/es\\_mx/forms/about/](https://www.google.com/intl/es_mx/forms/about/).
- [6] García Aretio, L. (2014): Web 2.0 vs Web 1.0. Contextos. Universitarios Medios, nº 14,1 (ISSN: 2340-552X)
- [7] Google Drive (2018). Support.google.com: <https://support.google.com/drive/answer/2424384?hl=es-419>.
- [8] Kahoot! Studio (2017): <https://kahoot.com/partners/studio/>.
- [9] O'Reilly, Tim, 2007. What Is Web 2.0: Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software, MPRA Paper 4578, University Library of Munich, Germany.
- [10] Organista-Sandoval, J., McAnally-Salas, L., & Lavigne, G. (2013). El teléfono inteligente (smartphone) como herramienta pedagógica. *Apertura*, 5(1).
- [11] Socrative (2017). Socrative by MasteryConect. Recuperado de <http://socrative.com>.
- [12] Vergnaud, G. (2016). ¿En qué sentido la teoría de los campos conceptuales puede ayudarnos para facilitar aprendizaje significativo? *Investigações em ensino de ciências*, 12(2), 285-302.
- [13] Vila, R. R., Lueg, C. F., Teruel, J. D. Á., Mira, J. E. B., Carreres, A. L., López-Meneses, E. y González, T. P. (2015). La WebQuest: una herramienta disponible en la Web 2.0 que permite renovar las prácticas docentes. In *Investigación y Propuestas Innovadoras de Redes UA para la Mejora Docente* (pp. 942-957). Instituto de Ciencias de la Educación.

# **MITIGACIÓN DE TORMENTA DE BROADCAST EN LA TRANSMISIÓN DE MENSAJES DE EMERGENCIA USANDO COMPARTICIÓN DE ESPECTRO EN VANETS DE RADIO COGNOSCITIVO**

## *BROADCAST STORM MITIGATION IN EMERGENCY MESSAGES TRANSMISSION USING SPECTRUM SHARING IN COGNITIVE RADIO VANETS*

**José Ulises Avalos Gómez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*ulisesavalos@live.com.mx*

**Ulises Pineda Rico**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*u\_pineda@galia.fc.uaslp.mx*

**Marco Aurelio Cárdenas Juárez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*mcardenas@galia.fc.uaslp.mx*

**Armando Arce Casas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*armando.arce@uaslp.mx*

**Enrique Stevens Navarro**

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*estevens@galia.fc.uaslp.mx*

### **Resumen**

El denominado fenómeno de tormenta de broadcast presente en las redes inalámbricas y con gran número de nodos; es importante atacarlo durante la implementación de aplicaciones de seguridad en las redes vehiculares de radio cognoscitivo (COG-VANETs). En este trabajo se presenta una breve introducción a las COG-VANETs y radio cognoscitivo, y como es que estas dos tecnologías se pueden conjuntar para ayudar a la transmisión eficiente de mensajes de seguridad. Se presenta el modelo matemático que utiliza la banda de Comunicaciones Dedicadas de Rango Corto (DSRC) y la banda de Espacios en blanco de TV (TVWS) para la transmisión de los mensajes de seguridad. Se muestran los

resultados del modelo bajo condiciones de saturación de la densidad, y se abordan la discusión y conclusiones de los efectos de la densidad y como se relaciona directamente con el problema de tormenta de broadcast, además se sugieren líneas de solución y mejora.

**Palabras Claves:** Broadcast, mensajes de seguridad, radio cognoscitivo, redes vehiculares.

## **Abstract**

*The so-called broadcast storm phenomenon which is common at wireless networks and in other networks with high number of users; it is important to attack it in the implementation of security applications in the cognitive radio vehicle networks (COG-VANETs). This paper presents a brief introduction to COG-VANETs and cognitive radio and how these two technologies can be combined to help the efficient transmission of safety messages. In this work is presented the mathematical model that incorporates the Dedicated Short-Range Communications (DSRC) and TV White Spaces (TVWS) bands for the transmission of safety messages. Also the results of the model under conditions of saturation of density are shown, and the discussion and conclusions of the effects of density and how it relates directly to the problem of broadcast storm are addressed. Lines of solution and improvement are also suggested in order to mitigate this phenomenon.*

**Keywords:** Broadcast, cognitive radio, safety messages, vehicular networks.

## **1. Introducción**

### **Radio cognoscitivo**

La tecnología de radio cognoscitivo surgió como una manera de mejorar la utilización del espectro explotando las oportunidades de espectro tanto en bandas con licencia y bandas sin licencia (libres). La operación de un radio cognoscitivo empieza con la percepción del medio de radiofrecuencia (RF). Los radios cognoscitivos deben ser capaces de aprovechar información acerca del ambiente inalámbrico, al ser conscientes del uso de espectro local y temporal. Los usuarios cognoscitivos (oportunistas) pueden seleccionar dinámicamente los mejores

canales disponibles, y a la par reconfigurar sus parámetros de transmisión para evitar interferencia perjudicial entre los usuarios del espectro.

### **Redes vehiculares de radio Cognoscitivo**

Las llamadas Redes Vehiculares Ad Hoc (VANETs, por sus siglas en inglés) pretenden mejorar la seguridad y la eficiencia durante el camino, y proveer acceso a Internet en movimiento, incorporando comunicación inalámbrica y tecnologías de la información dentro de los sistemas de transporte a través de 2 tipos de aplicaciones [Sohan, 2015]; *Aplicaciones de seguridad*: para evitar accidentes viales y mejorar la seguridad vial. Estas aplicaciones incluyen: (a) alerta de colisión frontal, (b) alerta de emergencia en el vehículo, (c) diagnóstico remoto del vehículo, (d) alerta de conducción de mala manera, (e) alerta de violación de señal, (g) alerta de pérdida de control, etc. Y *aplicaciones de información y entretenimiento*: éstas son aplicaciones no propiamente de seguridad, tales como: (a) servicios locales informativos, (b) servicios del desempeño del sistema, (c) servicios acceso a Internet, etc.

En la actualidad, el número de vehículos que poseen la habilidad de desempeñar comunicaciones inalámbricas son solo una pequeña fracción del mercado total. Además, el ancho de banda requerido para las comunicaciones inalámbricas de estos vehículos es relativamente bajo comparado con las aplicaciones inalámbricas desempeñadas por estos vehículos en otros sectores comerciales, tales como la telefonía móvil y el Internet inalámbrico de banda ancha.

Muchas bandas de frecuencia han sido ya asignadas específicamente para comunicaciones V2V (vehículo a vehículo) y V2I (vehículo a infraestructura), tal como la banda de 760 mhz en Japón y la banda de 5.8-5.9 ghz en varios países. Más aún, muchos estándares que soportan comunicaciones vehiculares han sido ya designados alrededor de estas bandas, por ejemplo: IEEE 1609 y IEEE 802.11p. [Pagadarai, 2013].

Sin embargo, ya se vislumbra que la cantidad de intercambio de información de V2V y V2I a través de las comunicaciones inalámbricas se incrementará significativamente en un futuro cercano, debido al número creciente de vehículos

habilitados con tecnología inalámbrica para aplicaciones de comunicación vehicular y la alta tasa de datos sobre flujo de tráfico. Consecuentemente, el problema de escasez del espectro actualmente experimentado por varios sectores de las telecomunicaciones afectará en el corto y mediano plazo a la industria automotriz. Por lo tanto, técnicas innovadoras que habiliten el uso más eficiente del espectro por las VANETS son altamente requeridas.

Una solución prometedora para la creciente demanda son las soluciones que permitan políticas de DSA (Acceso Dinámico al Espectro) Vehicular (VDSA, por sus siglas en inglés). Donde los sistemas de comunicación vehicular pueden tomar prestado temporal y oportunamente frecuencias del espectro, ocupadas para ejecutar intercambios de información V2I y V2V mientras se respeta simultáneamente los derechos y las transmisiones de usuarios con licencia. Derivado de lo anterior, surgen las redes vehiculares cognoscitivas [Anwer, 2015], [De Domenico, 2012][Gavrilovska, 2014] (COG-VANETS, por sus siglas en inglés) como un área de investigación incipiente y con mucho potencial para los próximos años. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es proponer un modelo novedoso de control de acceso al medio para COG-VANETS [Singh, 2014], que explore el uso de radio cognoscitivo para solucionar un problema adicional en las redes vehiculares al momento de implementar aplicaciones de seguridad; y el cuál es identificado como tormenta de broadcast.

## **2. Métodos**

### **Modelo usando compartición de espectro con TVWS**

La arquitectura del sistema de estudio es una VANET con capacidades de radio cognoscitivo, es decir, una COG-VANET con enlaces distribuidos. Los nodos de la red pueden realizar comunicación vehículo a vehículo (V2V), con un radio bajo el estándar vehicular 802.11p en la banda DSRC, y cuentan con un radio independiente que utiliza el estándar 802.11 en la banda de los espacios blancos de televisión (TVWS, por sus siglas en inglés). Los usuarios de la COG-VANET se comunican en la banda de DSRC como la banda principal o licenciada (usuarios primarios), y utilizan la banda de TVWS como una banda de radio cognoscitivo

(usuarios secundarios) para ayudar a la difusión de los mensajes de seguridad. Se toma de referencia para el sistema el que se describe en [Lim, 2014].

Se aborda el problema de difusión de mensajes de seguridad en la red, considerando que los mensajes de seguridad deben de difundirse a todos los nodos de la red con la menor cantidad de saltos y de manera exitosa (Alcanzabilidad de los ESM). En el entorno de la difusión de mensajes de seguridad existe una transmisión periódica de paquetes PBM (Mensajes Periódicos de alertas o advertencias) y ESM (Mensajes de emergencia de seguridad). Los PBM son mensajes cortos y de baja prioridad y los ESM se generan al ocurrir un evento de emergencia, por ejemplo, un choque o incidente, que requiere de respuesta inmediata por parte de los vehículos cercanos al evento e incluso vehículos que se aproximan al lugar del incidente. Pero que geográficamente se encuentran a una distancia considerable (1 km o más). En la figura 1, se muestra la operación de la COG-VANET para aplicaciones de seguridad.

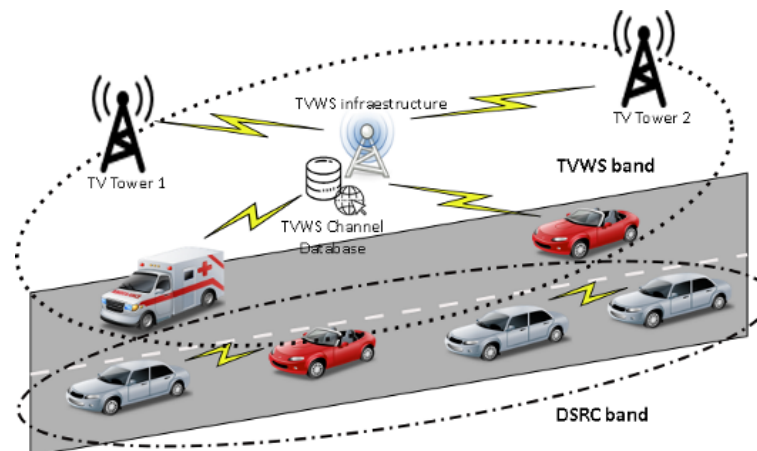


Figura 1 Uso de TVWS para difusión de mensajes de seguridad en COG-VANETs.

La operación del modelo propuesto por [Lim, 2014] se muestra en la figura 2a, donde los vehículos que cuentan con interfaz de TVWS perciben periódicamente el espectro en la banda de los TVWS para reservar un canal disponible. El cuál será utilizado cuando se generé un mensaje ESM (TCRA – Algoritmo de reservación de canal TVWS). En figura 2b, la red vehicular opera de acuerdo al estándar IEEE 802.11p para la difusión de mensajes PBM en la banda DSRC. Cuando se presenta



un incidente, el vehículo que genera el mensaje ESM deja de transmitir mensajes PBM y utiliza el canal que ya había reservado en la banda de TVWS para difundir el mensaje ESM en la red, como se visualiza en figura 2c. Si la transmisión del mensaje ESM no es exitosa para todos los vehículos de la red, se retransmite en la banda DSRC para el resto de los vehículos de forma reactiva, como se muestra en figura 2c con los enlaces de color rojo (TWRA – Algoritmo de retransmisión de 2 vías). Y, además, se complementa con el uso de una retransmisión proactiva del mensaje ESM en la banda de TVWS.

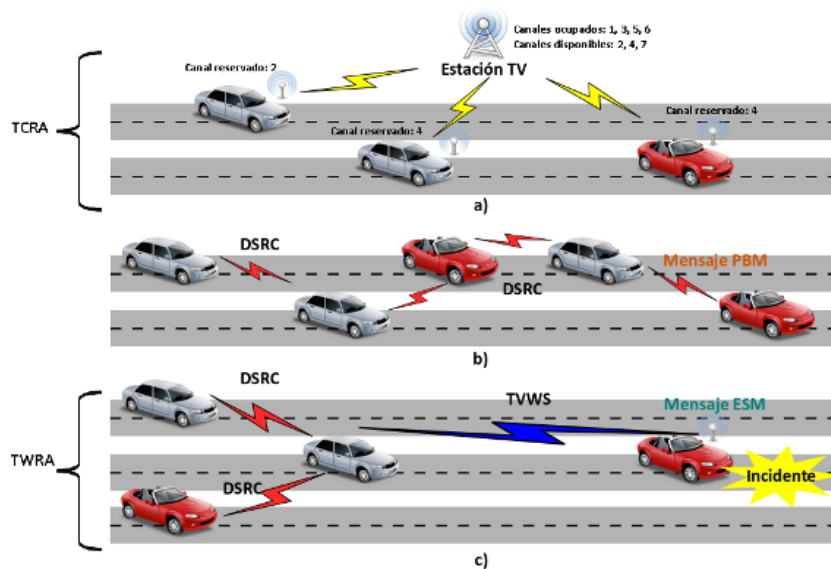


Figura 2 Operación de modelo base para la retransmisión de ESM en una COG-VANET.

### Modelo matemático del sistema

En el modelo matemático [Lim, 2014], se asume que todas las fallas en la reservación de canal pueden ser descubiertas al detectar una señal de jamming usando la detección de preámbulo; se asume que la probabilidad de detección de la señal es prácticamente 1. En la fase de jamming los vehículos descubren el inicio de la fase de retransmisión, transmitiendo una señal de jamming en la banda DSRC. Como segunda suposición, se asume que los vehículos pueden detectar un tono en la banda DSRC y una señal de inicio de trama (SOF) con probabilidad de 1. Se asume que el algoritmo de retransmisión difiere los mensajes PBM. Por lo tanto, las señales de tono SOF y DSRC no interfieren con ninguna señal.

En la figura 3, se muestra el diagrama de tiempos para la difusión del ESM. Primero; cuando ocurre un mensaje de emergencia un ESM es transmitido en una banda de los TVWS. El vehículo iniciador de ESM envía una señal de referencia  $R_s$ , espera un tiempo de guarda  $\varepsilon$ , y posteriormente envía el ESM, si algún vehículo vecino detecta él  $R_s$  puede recibir el ESM. Pero la recepción del ESM puede fallar debido a que el vehículo receptor se encuentre fuera del área de servicio del iniciador de ESM o por problemas de interferencia. Los vehículos que reciben exitosamente el ESM transmitido en la banda de los TVWS, pueden retransmitir el ESM a los vehículos que han fallado en la recepción o que no estaban dentro del área de servicio inicial, pero ahora realizando la retransmisión sobre la banda DSRC. El vehículo que envía el ESM difiere el intercambio de PBM y espera un tiempo de guarda  $\Delta$ , y envía una señal de sincronización de tráfico (jamming). Si uno de los vecinos detecta la señal de sincronización, reconoce que un mensaje ESM está disponible para ser transmitido. Después de la señal de sincronización el vehículo retransmisor envía una trama de inicio (SOF), si el vehículo vecino detecta el SOF este responde con una señal de tono DSRC después de un tiempo de guarda  $\varepsilon$ . Al momento de detectar la señal de tono, el retransmisor envía el ESM, de esta forma finaliza un ciclo de retransmisión en la banda DSRC.

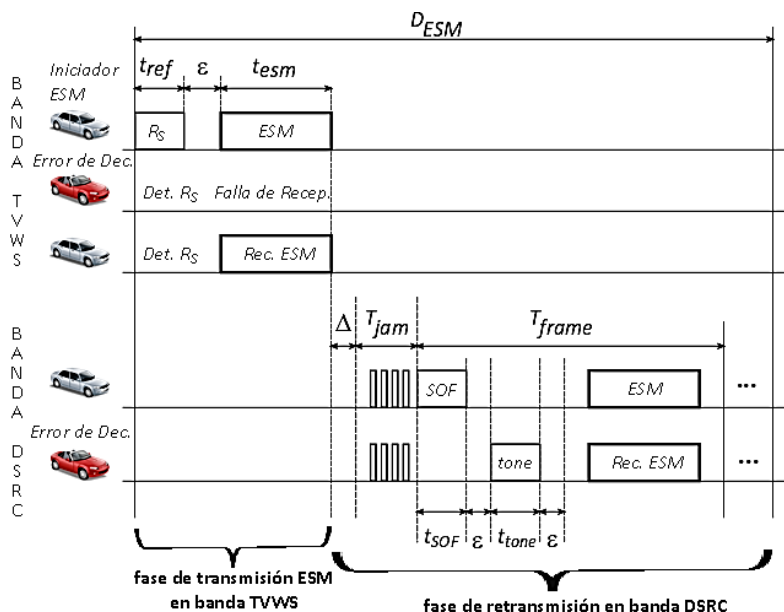


Figura 3 Diagrama de tiempos para la difusión de un ESM.

La transmisión inicial en la banda de los TVWS, y una retransmisión en la banda DSRC, son dos eventos mutuamente excluyentes. Por tal motivo en el modelo matemático, la probabilidad total de recepción de ESM o Alcanzabilidad de ESM, en la ecuación 1, es la suma de  $P_{\text{éxito,tvws}}^{\text{esm}}$  la probabilidad de recepción en la banda de TVWS y  $P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}}$  la probabilidad de recepción en la banda de DSRC.

$$P_{\text{éxito,total}}^{\text{esm}} = P_{\text{éxito,tvws}}^{\text{esm}} + P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}} \quad (1)$$

La recepción exitosa de ESM en la banda de TVWS es expresada en la ecuación 2 como; el producto de  $P_{\text{reservación}}$  la probabilidad de reservación exitosa entre el iniciador ESM y los vehículos dentro de un área de servicio y  $P_{\text{dec,tvws}}^{\text{esm}}$  la probabilidad de decodificar un ESM en una banda de TVWS.

$$P_{\text{éxito,tvws}}^{\text{esm}} = (P_{\text{reservación}}) (P_{\text{dec,tvws}}^{\text{esm}}) \quad (2)$$

La probabilidad de reservación  $P_{\text{reservación}}$ , puede ser derivada de una probabilidad de detección de preámbulo [Howland, 2007], de la misma forma la  $P_{\text{dec,tvws}}^{\text{esm}}$ , puede ser fácilmente calculada de una aproximación de curvas [IEEE, 2010]. La probabilidad de recepción exitosa en la banda DSRC durante la fase de retransmisión  $P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}}$ , se lleva a cabo para compensar los errores de recepción de ESM en una banda de TVWS, y es expresada en la ecuación 3.

$$P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}} = (1 - P_{\text{éxito,tvws}}^{\text{esm}}) (P_{\text{retr,dsrc}}^{\text{esm}}) \quad (3)$$

donde  $P_{\text{retr,dsrc}}^{\text{esm}}$  es la probabilidad de recepción exitosa de ESM en la fase de retransmisión en la banda DSRC. La cuál se define en la ecuación 4 como:

$$P_{\text{retr,dsrc}}^{\text{esm}} = 1 - \prod_{k=1}^{n_{\text{frames}}} (1 - P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}}(k)) \quad (4)$$

donde,  $P_{\text{éxito,dsrc}}^{\text{esm}}(k)$  es la probabilidad de recepción de ESM en la  $k$ -ésima trama de tiempo de DSRC,  $n_{\text{frames}}$  el número de tramas de tiempo de DSRC en la fase de retransmisión. La fase de retransmisión consiste de una fase de diferido ( $\Delta$ ), una

fase de jamming ( $T_{jam}$ ), y una fase de retransmisión que puede ser dividida entre múltiples tramas de tiempo de DSRC ( $T_{frame}$ ). El número de tramas de tiempo de DSRC en la fase de retransmisión puede ser calculada como se muestra en la ecuación 5.

$$n_{frame} = \frac{D_{ESM} - t^{tvws}_{ref} - \varepsilon - t^{tvws}_{esm} - \Delta - T_{jam}}{T_{frame}} \quad (5)$$

donde  $[x]$  es la función techo,  $\varepsilon$  un tiempo de guarda,  $t^{tvws}_{ref}$  el tono de referencia de TVWS,  $t^{tvws}_{esm}$  el tono de ESM en TVWS y  $D_{ESM}$  el retraso de difusión de un mensaje ESM.

Cada retransmisión de un mensaje ESM en la banda DSRC está compuesta por dos etapas: una de transmisión de señales SOF y de tono (Etapa1) y la otra para retransmitir un ESM (Etapa2). En la Etapa 1, de acuerdo a la ecuación 6, los vehículos transmiten las señales de tono y SOF sin CSMA/CA, la Etapa 1 puede ser calculada en la ecuación 6 como:

$$Etapa1 = t_{SOF} + 2\varepsilon + t_{tone} \quad (6)$$

donde  $t_{SOF}$  es la duración de una señal SOF,  $t_{tone}$  la duración de una señal de tono DSRC. En la Etapa2, como se muestra en la ecuación 7, un vehículo transmite un ESM con CSMA/CA. La etapa 2 de la  $i$ -ésima trama de tiempo DSRC es considerada dentro del tiempo esperado de las ranuras con una longitud igual a  $E[ranura(i)]$ , el valor esperado es obtenido por:

$$E[ranura(i)] = (T^{esm})(P_{busy}(i)) + \sigma(1 - P_{busy}(i)) \quad (7)$$

donde  $T^{esm}$  es el retardo de transmisión de un ESM y  $\sigma$  es una unidad de tiempo de retroceso, y  $P_{busy}(i)$  es la probabilidad de que el canal esté ocupado en la ranura de tiempo esperada de la  $i$ -ésima trama. Debido a que el canal está ocupado por la transmisión de un ESM,  $P_{busy}(i)$  puede ser expresada en la ecuación 8 como:

$$P_{busy}(i) = 1 - (1 - \tau(i))^{n^{esm}_{usc}(i)} \quad (8)$$

Donde  $\tau(i)$  es una probabilidad de intento de transmisión en una ranura de tiempo de la  $i$ -ésima trama, y  $n_{\text{VEC}}^{\text{ESM}}(i)$  es el número de vehículos que intentan transmitir un ESM en la  $i$ -ésima trama. Ya que los vehículos seleccionan un número de retroceso entre 0 y CW,  $\tau(i)$  es calculado por la ecuación 9:

$$\tau(i) = \left( \frac{2}{1 + CW} \right) \left( \frac{\min(m(i), CW)}{CW} \right) \quad (9)$$

Donde  $CW$  es un tamaño de ventana de contención que es usado para retransmitir un ESM. En la etapa 2, los vehículos pueden transmitir un ESM si han escuchado una señal de tono DSRC y ya han recibido el ESM.

Después de resolver el sistema de ecuaciones con el método de Newton [Nieves, 2007], el objetivo es maximizar la Alcanzabilidad de ESM, mostrado en la ecuación 10, encontrando el valor óptimo de la ventana de Contención  $CW$ . La búsqueda de la configuración optima es con método de "búsqueda de fuerza bruta" usando  $CW$  con un rango de 1 a 300 en pasos de 1. El óptimo  $P_{\text{éxito,total}}^{\text{ESM}}$  es calculado para cada  $CW$  después de encontrar los parámetros de configuración se resuelve el sistema;  $\tau(i)$  y  $P_{\text{busy}}(i)$ . El umbral de error en la búsqueda de la solución del sistema es  $E = 0.05\%$ .

$$(cw) = \underset{CW^3, 1, T_{\text{frames}} \text{ á } D_{\text{ESM}}}{\text{arg}} \left( \text{Max} \left( P_{\text{éxito,total}}^{\text{ESM}} \right) \right) \quad (10)$$

### Tormenta de Broadcast

En un entorno vehicular de intercambio de mensajes de seguridad, es necesario propagar la información a toda la red a través de un mecanismo de broadcast, lo cual requiere de múltiples saltos o retransmisiones de un mensaje de seguridad. Sin embargo, un mecanismo convencional de broadcast tiene que lidiar con el problema llamado Tormenta de Broadcast, lo que significa que hay un alto nivel de contención y de colisiones debido al excesivo número de paquetes de broadcast. Algunos trabajos como [Wisitpongphan, 2007], han cuantificado el impacto de la tormenta de broadcast en las VANETs en términos del retraso de un mensaje y la tasa de perdida

de paquetes. La Tormenta de Broadcast se presenta cuando la densidad de los vehículos en la red incrementa (ciudades y suburbios), y por ende el número de vehículos que retransmiten el mensaje de seguridad a la red es mayor, ocasionando más número de colisiones y contención.

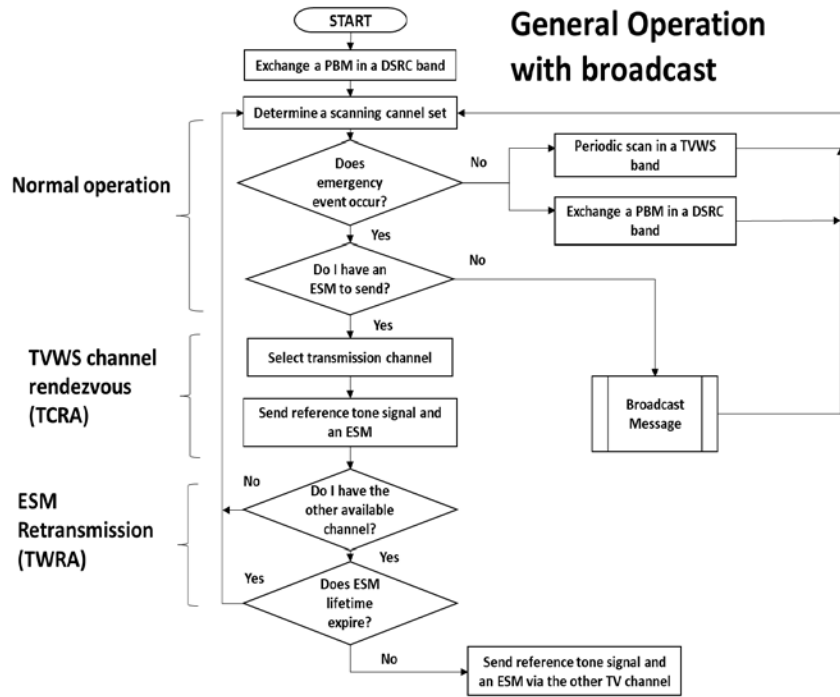


Figura 4 Diagrama de protocolo de diseminación con difusión de ESM.

En la figura 4 se muestra la forma en que opera el protocolo de diseminación de ESM dentro de una VANET cognoscitiva, propuesto por [Lim, 2014], donde se divide en tres etapas. La primera etapa es de operación normal donde se intercambia PBMs en la banda DSRC y los vehículos con capacidad cognoscitiva, perciben el medio periódicamente para descubrir canales disponibles en la banda TVWS para la difusión de ESM. La segunda etapa empieza con la presencia de un ESM por enviar, donde los vehículos que van a iniciar la difusión de ESM realizan un Algoritmo de reservación de canal en la banda TVWS. La tercera etapa consiste en realizar la retransmisión de ESM en la banda DSRC para mejorar la diseminación en toda la red (TWRA) y un algoritmo de retransmisión que en este caso es modificado para que se emplee un método de RTB/CTB (request to broadcast/clear

to broadcast). Con el fin de evitar duplicidad de mensajes de difusión al determinar nodos relé para la difusión de los mensajes ESM. Al modificar este el diagrama mostrado en la figura 4 incorpora el bloque de “broadcast message”.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos del sistema consideran la evaluación numérica del modelo matemático con la herramienta de MATLAB, considerando 10 retransmisiones en la banda DSRC y haciendo un barrido de la ventana de contención CW desde 0 hasta 300, así como la visualización de la Alcanzabilidad de ESM [Lim, 2014] para diferentes valores de la densidad vehicular. La densidad de la red es una variable importante en el problema de tormenta de broadcast, ya que, al momento de haber más vehículos vecinos para la retransmisión, el número de colisiones y contención aumenta.

Como se muestra en la figura 5 la Alcanzabilidad de ESM, es decir la probabilidad de que el ESM sea recibido exitosamente, sufre un decaimiento cuando la ventana de contención es más grande, y conforme el valor de la densidad vehicular aumenta es necesario usar una ventana de contención mayor para poder garantizar la mayor Alcanzabilidad del sistema, con retraso de ESM  $D_{ESM} = 1000$  y  $T^{ESM} = 27$  ms.

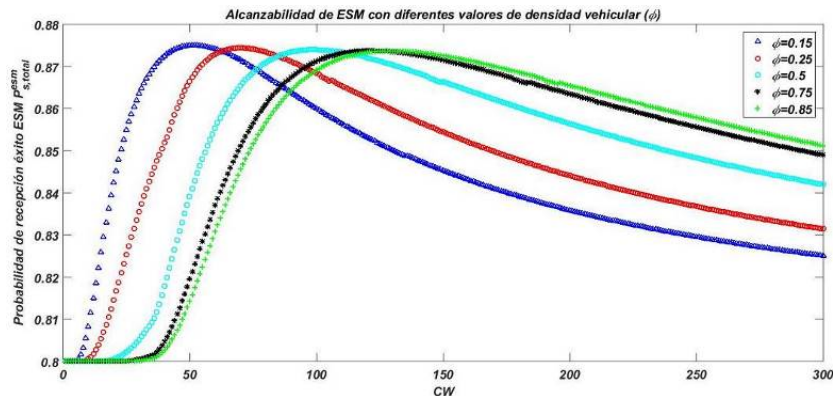


Figura 5 Alcanzabilidad de ESM con diferentes valores de densidad de vehículos  $\phi$ .

Por otra parte, en la figura 6 se muestra la probabilidad de ocupación del canal en la trama de retransmisión, es decir la probabilidad de que éste esté ocupado por otro vehículo para realizar la retransmisión de ESM, con retraso de ESM

$D_{ESM} = 1000$  y  $T^{ESM} = 27$  ms. Como se puede ver ésta probabilidad de ocupación es mayor conforme la densidad de la red aumenta por tal motivo es más fácil que pueda ocurrir una colisión.

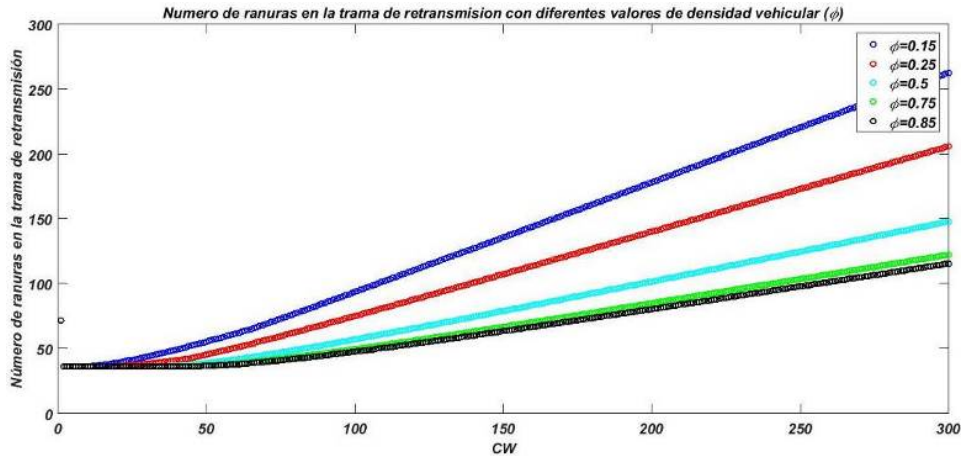


Figura 6 Probabilidad de ocupación del canal de retransmisión con diferentes valores de densidad de vehículos  $\phi$ .

Mientras, en la figura 7 se muestra la cantidad de ranuras de tiempo para trama de retransmisión dependiendo del valor de la densidad vehicular y del valor de la ventana de contención, con retraso de ESM  $D_{ESM} = 1000$  y  $T^{ESM} = 27$  ms. Como se puede ver en esta figura, mientras la densidad de vehículos es mayor, la cantidad de ranuras de tiempo es menor. Por lo cual es necesario transmitir un mensaje más pequeño en la trama de retransmisión.

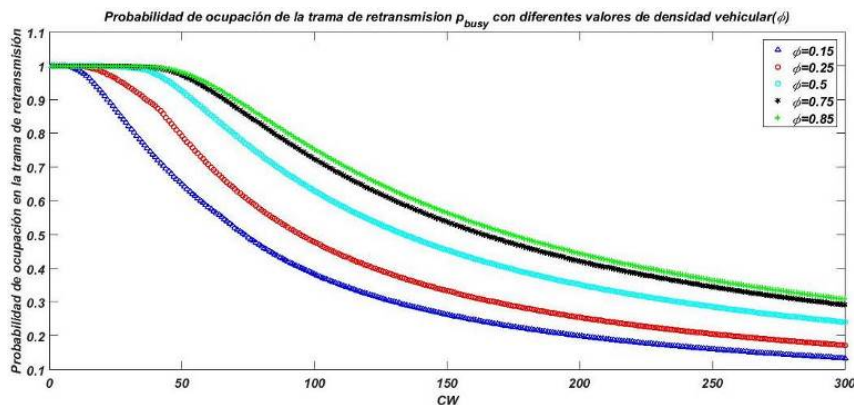


Figura 7 Número de ranuras en la trama de retransmisión con diferentes valores de densidad de vehículos  $\phi$ .



## **4. Discusión**

Los resultados mostrados en la sección anterior se realizaron utilizando el modelo de [Lim, 2014] como base. En estos resultados se pretendía visualizar el efecto que tiene el aumento de la densidad vehicular dentro de una VANET, en términos de la probabilidad de recepción exitosa del ESM; el número de ranuras disponibles para retransmisión en la trama de la banda DSRC; y la probabilidad de ocupación del canal. El comportamiento de estas tres métricas, en un sistema de contención vehicular proporciona información para poder entablar estrategias para mejorar cada uno de estos en un ambiente de *tormenta de broadcast*. Que a comparación del modelo original no se está abordando este problema, y el objetivo es la mitigación de éste en un ambiente cognoscitivo de redes vehiculares.

Estas limitantes que se visualizan en una condición de saturación de la red (incremento de la densidad vehicular). Se pretende puedan disminuir con el uso de técnicas de mitigación de la tormenta de broadcast, a base de métodos basados en probabilidad por pesos [Wisitpongphan, 2007], segmentación de la distancia que existe entre el vehículo que transmite el ESM [Bi, 2016], [Sahoo, 2011] y la asignación de un vehículo relé para la difusión del ESM [Bi, 2016], [Korkmaz, 2006] [Suthaputchakun, 2014]. Uno de los cambios importantes en el modelo original es la incorporación del bloque de *broadcast message*, donde se incorporará un esquema de señalización que disminuya la duplicidad de mensajes de broadcast, y así disminuir los efectos de la *tormenta de broadcast*.

## **5. Conclusiones**

Si bien un modelo que utiliza las características de radio cognoscitivo para aumentar la probabilidad de recepción exitosa de un mensaje ESM y de que este se difunda a todos los vehículos de la red. También es primordial garantizar que al momento de difundir el ESM a todos los vehículos se lidie con el problema de tormenta de broadcast, por este motivo el buscar una solución a este problema en el entorno de las COG-VANETs es de suma importancia. El trabajo a futuro es la implementación de este esquema que mitigue el fenómeno de tormenta de broadcast en el modelo antes presentado.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Anwer Tareq, Haque Hasib Hamidul, Hasan Md. Asif and Islam Md. Jahidul, Investigating the Challenges of Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio-enabled Vehicular Ad Hoc Networks (CR-VANETs), in International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT), Dhaka, Bangladesh, 21-23 May 2015.
- [2] Bi Yuanguo, Shan Hangguan, Shen Xuemin, Wang Ning, and Zhao Hai, A Multi-Hop Broadcast Protocol for Emergency Message Dissemination in Urban Vehicular Ad Hoc Networks, in IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 3, March 2016, pp. 736-750.
- [3] De Domenico Antonio, Calvanese Strinati Emilio and Di Benedetto Maria-Gabriella, A Survey on MAC Strategies for Cognitive Radio Networks, in IEEE Communications Surveys and Tutorials, Vol. 14, No. 1, First Quarter 2012, pp. 21-44.
- [4] Gavrilovska Lilijana, Denkovski Daniel, Rakovic Valentin and Angjelichinoski Marko, Medium Access Control Protocols in Cognitive Radio Networks: Overview and General Classification, in IEEE Communication Survey and Tutorials, Vol. 16, no. 4, 4th quarter 2014, pp. 2092-2124.
- [5] Howland Keith C., Signal Detection and Frame Synchronization of Multiple Wireless Networking Waveforms, Master's thesis, in Calhoun: The NPS Institutional Archive of the Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2007-09.
- [6] IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments, 2010.
- [7] Korkmaz Gökhan, Ekici Eylem, and Özgüner Füsün, An Efficient Fully Ad-Hoc Multi-Hop Broadcast Protocol for Inter-Vehicular Communication Systems, ICC '06. IEEE International Conference on Communications, Istanbul, Turkey, 11-15 June 2006.

- [8] Lim Jae-Han, Kim Wooseong, Naito Katsuhiro, Yun Ji-Hoon, Cabric Danijela and Gerla Mario, Interplay Between TVWS and DSRC: Optimal Strategy for Safety Message Dissemination in VANET, in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol 32, No. 11, November 2014, pp. 2117-2133.
- [9] Nieves Antonio, Domínguez Federico C., *Métodos numéricos aplicados a la ingeniería*, 3rd ed., Patria: México, 2007, pp. 321-338.
- [10] Pagadarai Srikanth, Lessard Bennett A, Wyglinski Alexander M., Vuyyuru Rama, and Altintas Onur, Vehicular Communications, Enhanced Networking Through Dynamic Spectrum Access, in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Vol. 8, No. 3, September 2013, pp. 93-103.
- [11] Sahoo Jagruti, Wu Eric Hsiao-Kuang, Sahu Pratap Kumar, and Gerla Mario, Binary-Partition-Assisted MAC-Layer Broadcast for Emergency Message Dissemination in VANETs, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 3, September 2011, pp. 757-770.
- [12] Singh Kamal Deep, Rawat Priyanka and Bonnin Jean-Marie, Cognitive Radio for Vehicular Ad Hoc Networks (CR-VANETs): Approaches and Challenges, in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2014, 2014:49.
- [13] Suthaputchakun Chakkaphong, Dianati Mehrdad, and Sun Zhili, Trinary Partitioned Black-Burst-Based Broadcast Protocol for Time-Critical Emergency Message Dissemination in VANETs, *IEEE Transactions On Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 6, July 2014, pp. 2926-2940.
- [14] Wisitpongphan N., Tonguz O.K., Parikh J. S., Mudalige P., Bai F. and Sadekar V., Broadcast Storm Mitigation Techniques in Vehicular Ad Hoc Networks, *IEEE Wireless Communications Magazine*, Vol. 14, No 6, December 2007, pp. 84-94.

# **IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE COMPUERTAS DIGITALES CON DISPOSITIVO MÓVIL Y REALIDAD AUMENTADA**

*AUTOMATIC IDENTIFICATION OF DIGITAL GATES THROUGH MOBILE DEVICE AND AUGMENTED REALITY*

**Carlos Avilés Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*caviles@azc.uam.mx*

**Juan Villegas Cortez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jvillegas@azc.uam.mx*

**Arturo Zúñiga López**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*azl@azc.uam.mx*

**Eduardo Rodríguez Martínez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*erm@azc.uam.mx*

**Andrés Ferreyra Ramírez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*fra@azc.uam.mx*

## **Resumen**

Los conceptos fundamentales de los dispositivos electrónicos generalmente son enseñados en los cursos iniciales de ingeniería eléctrica-electrónica. Es de suma importancia manejar los conceptos básicos que hacen posible las computadoras y los sistemas digitales en general. De entre los conceptos, destaca el álgebra booleana y la lógica de compuertas. La parte práctica es angular en la adquisición correcta de los conceptos. En el presente trabajo se aborda de una forma práctica la identificación de los circuitos integrados (CI) que hacen posibles operaciones lógicas: and, or, not, nor, nand. La identificación se lleva a cabo vía realidad aumentada (RA) y por medio de un dispositivo móvil corriendo en sistema operativo android. Se identifican CI's de forma automática, desplegando en pantalla el tipo de CI que se trate, adicionalmente se proporciona información de sus terminales y

la operación lógica respectiva. El porcentaje de reconocimiento es de 100% sobre 5 tipos de compuertas lógicas.

**Palabras Claves:** Android, circuitos lógicos, realidad aumentada.

## **Abstract**

*The fundamental concepts of electronic devices are generally taught in initial electrical-electronic engineering courses. It is of the utmost importance to handle the basic concepts that make computers and digital systems possible. Among the concepts, the Boolean algebra and the logic gates stand out. The practical part is angular in the correct acquisition of the concepts. This paper deals in a practical way with how to identify the integrated circuits (ICs) that make logical operations possible: and, or, not, nor, nand, through out augmented reality (AR). Across a mobile-based device running on an android operating system, you can automatically identify ICs by displaying the location and type of IC on the screen of the mobile device. The system has a recognition rate of 100.*

**Keywords:** Augmented reality, android, logic circuits.

## **1. Introducción**

La tecnología de Realidad Aumentada (RA) se ha venido trabajando en la última década, implica una mezcla de imágenes (o video) reales con imágenes generadas sintéticamente. La RA ha permitido la mejor interpretación y asimilación de ambientes y conceptos de una manera más simple. Toda tecnología de RA posee tres propiedades, la primera es la combinación del mundo real con virtual; la segunda radica en su interactividad y, la tercera, es el manejo de los objetos en 3D [Azuma, 1997]. El uso de la tecnología RA puede ser extendido al entendimiento de circuitos electrónicos, particularmente los circuitos lógicos, aunado al profuso uso de los dispositivos móviles entre universitarios. En el presente artículo se desarrolló una aplicación en un dispositivo móvil basado en android, para ubicar e identificar 5 tipos de circuitos integrado-montados en una tablilla de experimentación (protoboard). Se hizo uso del paradigma “sin marcas” y por medio de atributos invariantes a la rotación, traslación y escala, se identifica el

circuito y su matrícula, así de forma automática se identifica qué tipo de circuito integrado se está usando.

## **Estado del arte**

Los términos “realidad aumentada” y “realidad virtual” han ido ganando popularidad en la última década. Al igual que la realidad virtual, la realidad aumentada se ha convertido en una tecnología emergente en campos como la educación, debido a su fácil manejo y entendimiento de la información presentada. Por otro lado, el uso de dispositivos móviles es cada vez más habitual entre los jóvenes y adolescentes. En el campo de la educación ya se ha abordado la RA, tal es el caso de Billinghamurst y Duenser [Billinghurst, 2012] [Billinghurst, 2001] quienes desarrollaron un libro mágico donde crearon y presentaron historias. Por otro lado, Yilmaz et al. [Yilmaz, 2016] desarrollaron “the Educational Magic Toys (EMT)”, un juego para el desarrollo de la imaginación el cual fue valorado positivamente tanto por los niños usuarios como por los profesores. Con respecto a aplicaciones de RA en cursos de educación superior, se tienen aplicaciones en física [Martin-Gonzalez, 2016] [Daineko, 2017], en química [Sudana, 2017] [Merino, 2015], Ingeniería metalúrgica [Watanuki, 2010], mecánica [Monroy-Reyes, 2016], computación [Cubillo, 2015], medicina [Carlson, 2016] [Davis, 2016], arquitectura [González, 2017], Ciencia naturales [Mahmoudi, 2017] y la enseñanza de inglés [Richardson, 2016], principalmente.

## **2. Métodos**

El sistema propuesto se muestra en la figura 1, en donde se puede visualizar cada uno de los bloques constitutivos, así como sus componentes.

### **Captura de imagen**

Las imágenes de los circuitos integrados montados sobre la tablilla de pruebas son tomadas por medio del teléfono inteligente con sistema operativo android. El formato con el que trabajan los teléfonos es YCrCb (información de crominancia y luminancia) y codificado en formato NV21. En la presente metodología se realiza

el procesamiento de imágenes en el formato original YCrCb. En la figura 2 se muestra un ejemplo de circuitos integrados AND y OR montados sobre la tablilla de pruebas.

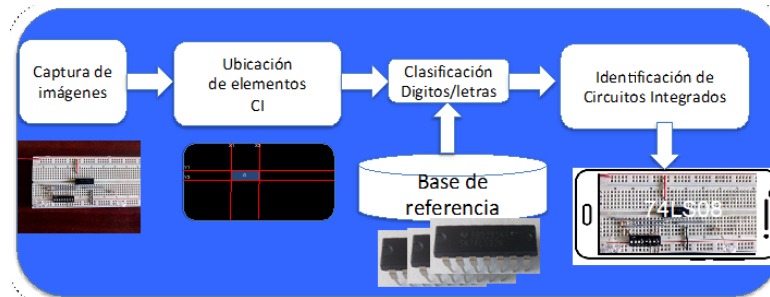
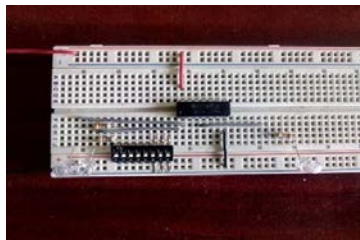


Figura 1 Esquema general del sistema de reconocimiento de circuitos integrados.



a) Circuito integrado AND.



b) Circuito integrado OR.

Figura 2 Ejemplo de los circuitos integrados identificados montados en la tablilla de pruebas.

### Ubicación de circuitos integrados

Por medio de los atributos SIFT [Lowe, 1999] (Scale Invariant Feature Transform) se ubican los circuitos integrados dentro de la tablilla de pruebas. Se ubica únicamente la parte rectangular de cada circuito. Posteriormente se hace un filtrado de solo las zonas en donde hay “rectángulos”, de la misma forma de los circuitos integrados. Se usó solo un CI como referencia, no importando que tipo de compuerta se trate. La figura 3a muestra un ejemplo de cómo se ubica el circuito integrado en la tablilla de pruebas. Una vez filtrados y aislados los CI, se localizan las coordenadas  $(X_i, Y_i)$  de cada uno de los circuitos por proyección de perfil en horizontal (PPH) y en vertical (PPV), encontrando la zona de mayor acumulación de valores (figura 3b). Por otro lado, como en los circuitos montados en la tablilla de pruebas cabe la posibilidad de tener interruptores múltiples similares a un CI, se hace un segundo filtrado por color, en este caso, un umbralizado por blancos.

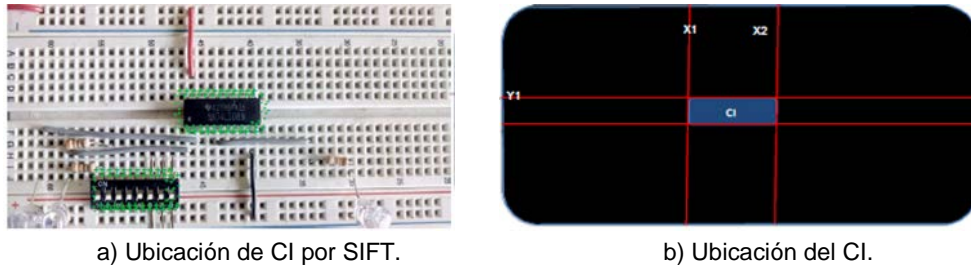


Figura 3 Ubicación y filtrado de circuitos integrados identificados en la tablilla de pruebas.

### Clasificación de dígitos/letras

Una vez obtenidos los circuitos integrados ubicados y aislados, se procede a tomar la matrícula de cada uno de ellos. Aplicando la misma metodología de acumulación por proyección horizontal y vertical se encuentran los límites de cada uno de las letras o dígitos dentro del CI. Particularmente, usando la acumulación por proyección horizontal se encuentran los límites entre cada carácter o dígito. Se separan cada uno, guardando la secuencia. Teniendo los caracteres aislados, se pasa ahora a su clasificación. En una primera etapa se hace el aprendizaje supervisado fuera de línea y posteriormente se usa el aprendizaje para la clasificación. A identificación de letras-números se realizó por medio de una red neuronal de tipo perceptrón multicapa, como se describe a continuación.

En la figura 4 se muestra la red neuronal usada para la clasificación de letras y dígitos. La red consta de una capa de entrada, capas intermedias y una capa de salida.

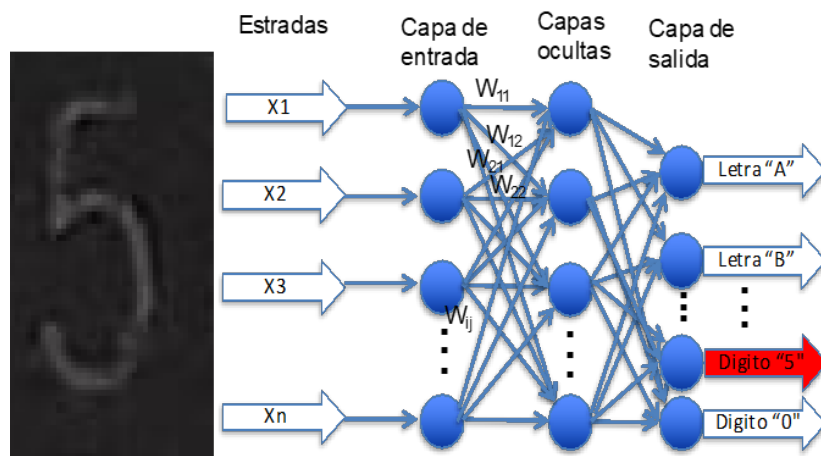


Figura 4 Red neuronal usada para clasificar letras/dígitos.



Los caracteres se redimensionaron a 256x256 píxeles, por tanto, la capa de entrada es 65,536 neuronas, se usaron 10 capas intermedias y a la salida fueron 36 neuronas (36 dígitos y letras); se usó el algoritmo de aprendizaje "back-propagation". Se dejó iterar el algoritmo 50,000 veces lo que permitió obtener un error de 0 % en clasificación. Se usó re-sustitución como método de evaluación de desempeño.

### **Identificación de circuitos integrados**

Teniendo identificados los caracteres y dígitos individualmente, se identifica la secuencia de cada circuito integrado, inicialmente se descartan todas las letras identificadas, por ejemplo: "SN" y "N". Se analizan los dígitos iniciando con "74" que corresponden a la serie. Posteriormente, se trabaja sobre los dos dígitos siguientes, que son los que indican el tipo de compuerta. En tabla 1 se precisa la correspondencia entre la terminación y el tipo de compuerta lógica existente en el circuito integrado.

Tabla 1 Correspondencia del tipo de circuito integrado por la terminación.

Terminación	Operación lógica
32	OR
08	AND
02	NOR
00	NAND
04	NOT

### **Generación de los objetos virtuales**

El objetivo del proyecto es facilitar a los estudiantes la identificación de los circuitos lógicos integrados de operaciones lógicas. La identificación se realiza mediante una foto tomada con el dispositivo móvil, ya sea un teléfono inteligente o bien, una tableta. Una vez procesada la imagen con los pasos descritos anteriormente, se está ahora, se está en posibilidad de añadir una capa virtual a la foto, que corresponde al texto con el tipo de circuito integrado y las características técnicas del CI. La figura 6 muestra un CI con su etiqueta sorbe puestas. Se puede apreciar el despliegue de los pines de polarización, las entradas y salidas. Se

plantea la hipótesis que con ésta información les será más fácil a los estudiantes de ingeniería al momento de realizar la experimentación en el laboratorio respectivo dado que no tendrá la necesidad del manual del fabricante del dispositivo.

Con respecto a la aplicación para el teléfono inteligente móvil, fue desarrollada en lenguaje de programación JAVA y compilada en eclipse. La aplicación puede ejecutarse en cualquier dispositivo móvil (teléfono o tableta) bajo el sistema operativo Android 6.0. La aplicación se desarrolló siguiendo el paradigma de programación "Modelo-Vista-Control", la cual se basa en un conjunto de clases.

### **3. Resultados**

Una vez llevado a cabo el análisis, diseño y construcción de todo el sistema propuesto, se procedió a realizar pruebas y resultados finales.

En la figura 5 se pueden apreciar algunos ejemplos de circuitos integrados. Fueron tomados de frente y con buena cantidad de luz, con lo cual serán más fácilmente identificables. Primero, se probó el óptimo funcionamiento del sistema de reconocimiento de caracteres aislados.

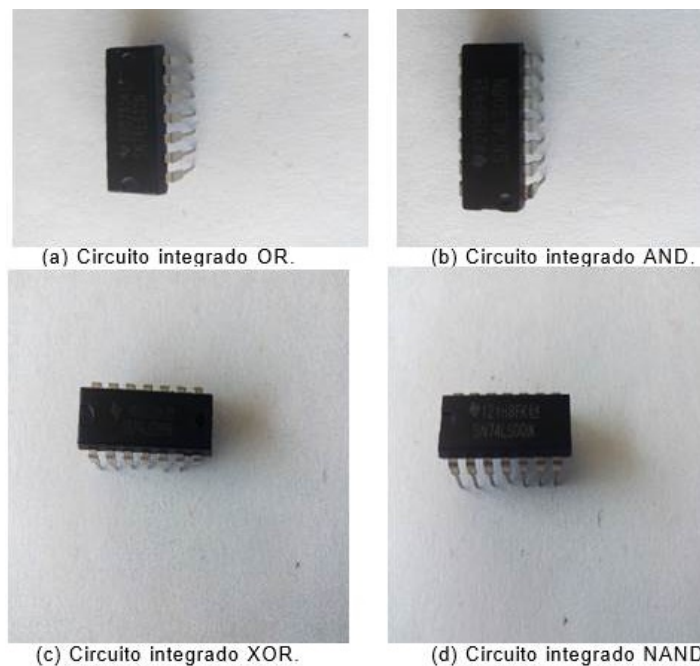


Figura 5 Ejemplo de los circuitos integrados identificados.

El objetivo fue el reconocer todas las letras del alfabeto, así como los dígitos del 0 al 9. Se tomaron 20 imágenes de cada dígito sobre los 5 tipos de circuitos integrados (ver ejemplo en la parte izquierda de la figura 4). Cada dígito fue tomado en rotaciones de 10 grados, por tanto, cada número está representado por 36 imágenes multiplicado por 20 dígitos diferentes, da un total de 720 imágenes por número para el entrenamiento. Aplicando resustitución como el método de evaluación de desempeño, dio el resultado mostrado en la tabla 2. Como se puede apreciar, el reconocimiento es del 100 % en condiciones de buena iluminación y que las fotografías tomadas sean de frente y completamente legibles.

Tabla 2 Resultados de identificación de letras y números aislados.

Caracter	Reconocimiento [%]	Caracter	Reconocimiento [%]	Caracter	Reconocimiento [%]
A	100	M	100	Y	100
B	100	N	100	Z	100
C	100	O	100	0	100
D	100	P	100	1	100
E	100	Q	100	2	100
F	100	R	100	3	100
G	100	S	100	4	100
H	100	T	100	5	100
I	100	U	100	6	100
J	100	V	100	7	100
K	100	W	100	8	100
L	100	X	100	9	100

En cuanto al reconocimiento de los circuitos integrados, la tabla 3 muestra el reconocimiento de la identificación de cada uno de ellos, cuádruples de 2 entradas de la serie de Texas Instrument [Texas, 2018].

Tabla 3 Identificación circuitos integrados, cuádruples 2 entradas serie Texas Instrument.

CI	Operación lógica	Reconocimiento
74LS32	OR	100
74LS08	AND	100
74LS02	NOR	100
74LS00	NAND	100
74LS04	NOT	100

En las 20 fotos tomadas para la evaluación de los resultados, se incluyen los circuitos integrados usados en el aprendizaje. Remarcamos que la metodología propuesta no es sensible a las imágenes de aprendizaje.

La última etapa del proyecto es la generación y empalme de los objetos virtuales, con la foto tomada inicialmente. Se proporciona dos tipos de información de los circuitos integrados identificados. Por un lado, la información lógica del CI y por otro lado, la información de cada una de sus terminales (pins). La figura 6 muestra un ejemplo para el CI 74LS08 correspondiente a la compuerta AND cuádruple. El usuario tiene la posibilidad de tomar una foto más cercana del CI lo que le permite hacer un acercamiento a la información técnica.

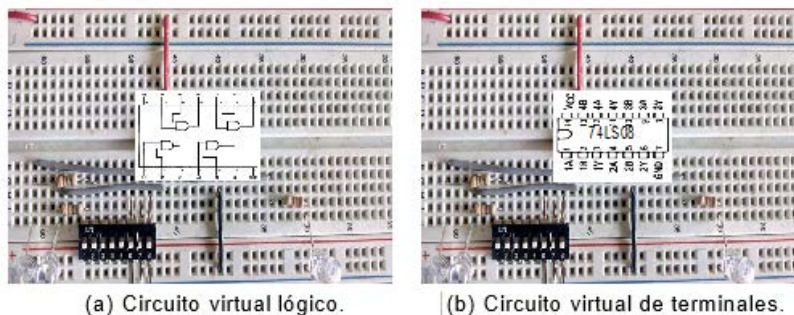


Figura 6 Objetos virtuales puestos a los circuitos integrados identificados.

#### **4. Discusión**

Una serie de experimentaciones se llevaron a cabo para validar el sistema propuesto. En condiciones controladas de buena iluminación, imágenes prácticamente de frente y completamente legible, el sistema trabaja perfectamente. Sin embargo, cuando en las imágenes tomadas de los circuitos no es legible la matrícula del CI, no se logra identificar nada, es decir, el sistema falla. El sistema es insensible a los cambios de escala, rotación y traslación, es decir, si el teléfono se encuentra lejos o cerca, de lado o inclinado, siempre y cuando sea legible. En las pruebas realizadas se tiene un rango de distancias entre el circuito y el celular, la distancia mínima medida fue de 2 cm y la máxima de 15 cm. Las condiciones lumínicas en que fueron realizadas la prueba fueron en un laboratorio real de experimentaciones con lámparas tipo LED. Las pruebas se hicieron con un teléfono celular Samsung Galaxy 8, con resolución de las imágenes de 4032x1960 pixeles. El tiempo de procesamiento de cada imagen es de 2 segundos, considerando el tiempo de tres horas que se le concede a los alumnos para realizar

sus prácticas, podríamos remarcar que 2 segundos es menor tiempo que ir a buscar la descripción técnica en las hojas del manual del fabricante.

Finalmente, planteamos que el sistema desarrollado puede ser una herramienta de ayuda para los estudiantes que inician sus estudios de ingeniería para la mejor comprensión e interpretación de los conceptos básicos de CI llevados a la práctica en los laboratorios experimentales. Es sabido que actualmente los estudiantes hacen uso profuso de los medios electrónicos como una forma natural de su aprendizaje cotidiano.

## **5. Conclusiones**

El sistema propuesto “Identificación automática de compuertas digitales con dispositivo móvil y realidad aumentada trabaja” exitosamente en cada una de sus etapas y en general. El sistema fue llevado a cabo bajo el paradigma “identificación sin marcas”, lo que implica que es capaz de reconocer los elementos sin marcarlos previamente o con algún código, y de manera autónoma. Por medio de atributos SIFT se logró ubicar adecuadamente los circuitos integrados en la tablilla de pruebas, posteriormente por métodos de filtrado de procesamiento digital de imágenes, se segmentan las letras y dígitos de cada circuito. La siguiente etapa fue la clasificación de las letras/dígitos por medio de una red neuronal. La clasificación tiene un éxito de 100% en condiciones de tomas fotográficas legibles de las matrículas de cada uno de los circuitos integrados, tomando en cuenta a los circuitos del aprendizaje. Con respecto al reconocimiento total de cada circuito integrado se llevó a cabo con una clasificación de árbol.

Como trabajo futuro está comprendido el ampliar a una mayor cantidad de circuitos integrados, así como analizar configuraciones de circuitos lógicos conectados ya sea en serie, en paralelo o una combinación de ambas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Billinghamurst, M., Kato, H., Poupirev, I.: The magicbook - moving seamlessly between reality and virtuality. IEEE Computer Graphics and Applications 21(3) 6–8, May 2001.

- [2] Azuma, R.T.: A survey of augmented reality. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 6(4) 355–385, August 1997.
- [3] Billinghamurst, M., Duenser, A.: Augmented reality in the classroom. *Computer* 45(7) 56–63, 2012.
- [4] Carlson, K.J., Gagnon, D.J.: Augmented reality integrated simulation education in health care. *Clinical Simulation in Nursing* 12, 4123–127 Special Issue, Gaming, 2016.
- [5] Cubillo, J., Martin, S., Castro, M., Boticki, I.: Preparing augmented reality learning content should be easy: Uned arlean authoring tool for augmented reality learning environments. *Computer Applications in Engineering Education* 23(5), 778–789, 2015.
- [6] Daineko, Y., Dmitriyev, V., Ipalakova, M.: Using virtual laboratories in teaching natural sciences: An example of physics courses in university. *Computer Applications in Engineering Education* 25(1), 39–47, 2017.
- [7] Davis, M.C., Can, D.D., Pindrik, J., Rocque, B.G., Johnston, J.M.: Virtual interactive presence in global surgical education: International collaboration through augmented reality. *World Neurosurgery* 86, 103–111, 2016.
- [8] González, N.A.A.: Development of spatial skills with virtual reality and augmented reality. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 1–12, 2017.
- [9] Lowe D. G., Object recognition from local scale-invariant features, *International Conference on Computer Vision, Corfu, Greece*, pp. 1150-1157, September 1999.
- [10] Mahmoudi, M.T., Mojtahedi, S., Shams, S.: Ar-based value-added visualization of infographic for enhancing learning performance. *Computer Applications in Engineering Education*, 2017.
- [11] Martin-Gonzalez, A., Chi-Poot, A., Uc-Cetina, V.: Usability evaluation of an augmented reality system for teaching euclidean vectors. *Innovations in Education and Teaching International* 53(6), 627–636, 2016.
- [12] Texas Instrument Co: <https://www.jameco.com/Jameco/catalogs/c113/P5.pdf>.

- [13] Merino, C., Pino, S., Meyer, E., Garrido, J.M., Gallardo, F.: Realidad aumentada para el diseño de secuencias de enseñanza-aprendizaje en química. *Educación Química* 26(2), 94–99, 2015.
- [14] Monroy Reyes, A., Vergara Villegas, O.O., Miranda Bojórquez, E., Cruz Sánchez, V.G., Nandayapa, M.: A mobile augmented reality system to support machinery operations in scholar environments. *Computer Applications in Engineering Education* 24(6), 967–981, 2016.
- [15] Richardson, D. Exploring the potential of a location based augmented reality game for language learning. *International Journal of Game-Based Learning* 6(3), 34–49, 2016.
- [16] Sudana, A.A.K.O., Setiawan, A., Pratama, I.P.: Augmented reality for chemical elements: Periodikar. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 90(1), 88, 2016.
- [17] Watanuki, K., Hou, L.: Augmented reality-based training system for metal casting. *Journal of Mechanical Science and Technology* 24(1), 237–240, 2010.
- [18] Yilmaz, R.M.: Educational magic toys developed with augmented reality technology for early childhood education. *Computers in Human Behavior* 54, 240–248, 2016.

# IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN Y REGISTRO DE DATOS CON RELOJ DE TIEMPO REAL Y ALMACENAMIENTO EN TARJETA MICROSD

## IMPLEMENTATION OF A DATALOGGER SYSTEM WITH REAL-TIME CLOCK AND STORAGE IN A MICROSD CARD

***Miguel Ángel Bañuelos Saucedo***

Universidad Nacional Autónoma de México

*miguel.banuelos@icat.unam.mx*

### Resumen

Los sistemas de medición y registro de datos (*dataloggers*) de tipo comercial pueden ser relativamente costosos. En el presente trabajo se muestra la implementación de un sistema de registro de datos, utilizando una plataforma de hardware libre (tarjeta Arduino); lo cual lo convierte en un dispositivo de bajo costo, configurable a las necesidades específicas del usuario, y una alternativa al uso de equipos comerciales. El sistema utiliza un módulo de expansión para el manejo de una tarjeta de memoria microSD, donde se almacenan los datos en formato compatible con hojas de cálculo. También cuenta con un módulo reloj de tiempo real para almacenar cada dato con su marca de tiempo. Se muestra el desempeño del sistema utilizando diferentes fuentes de alimentación: cargador de celular, batería de respaldo de un teléfono celular, fuente de laboratorio y un arreglo de pilas recargables de NiMH (Níquel, Metal, Hidruro). Finalmente, se presentan algunas opciones para reducir el consumo de energía que permiten que el sistema funcione durante 12 días con cuatro pilas AA de NiMH.

**Palabras Claves:** Arduino, *Datalogger*, registro de datos, reloj de tiempo real, tarjeta microSD.

### Abstract

*Commercial data acquisition and recording systems (dataloggers) can be relatively expensive. In this work, the development of a measuring and data recording system based on open hardware (Arduino board) is presented. The*



*resulting device is a low cost and general-purpose alternative to the use of commercial equipment. The system uses an expansion card for handling a microSD memory card, where data is recorded in a datasheet compatible format. It also has a real-time clock module which allows to register each data sample with its time-stamp. The performance of the system using different power sources such as a cellular phone charger, a cellular phone back-up battery, a laboratory power supply and a set of rechargeable NiMH (Nickel-metal hydride) batteries is also presented. Finally, some options for reducing the energy consumption are presented, which allow the system to operate for twelve days using four AA NiMH batteries.*

**Keywords:** *Arduino, datalogger, data recording, microSD card, real-time clock.*

## **1. Introducción**

En muchas aplicaciones se requiere de un registro continuo y autónomo de mediciones durante largos períodos, que pueden ir desde horas hasta meses; por ejemplo: mediciones meteorológicas, de estudios de suelos, deformaciones en edificios volcánicos, etc. Los instrumentos utilizados en estas aplicaciones proporcionan información invaluable sobre el comportamiento de un proceso. Sin embargo, la compra de equipo de registro de datos puede ser un problema para laboratorios con presupuesto limitado. Una de las opciones más económicas son los registradores de datos basados en USB como los desarrollados por DLP Design [Design, 2014]. Cuestan alrededor de 50 dólares americanos, cuentan con 8 canales que se pueden configurar como entrada/salida digital o entrada analógica a un convertidor analógico-digital de 10 bits. Presentan el inconveniente de requerir de la conexión constante a una computadora.

Los registradores de datos de tipo autónomo (que no requieren estar conectados a una computadora), tienen un costo a partir de los 140 dólares americanos, y muy comúnmente se trata de dispositivos que miden temperatura y humedad como el RHT20 de Extech [Extech, 2013]. Se pueden encontrar modelos que tienen entradas analógicas de propósito general como el Onset HOBO U12-013, a un costo de 150 dólares [Onset, 2016]. Este modelo cuenta con sensores de humedad y temperatura ambiente, y dos entradas adicionales de 0 a 2.5 V que se conectan a

un convertidor analógico-digital de 12 bits. Los precios mencionados no incluyen licencia de software, impuestos, ni gastos de envío.

Los sistemas comerciales de registro de datos están orientados a que el cliente adquiera los sensores desarrollados por la misma compañía. Esto deja fuera de uso la gran variedad de sensores que existen en el mercado, en particular los que se comunican con los protocolos seriales I<sup>2</sup>C (Inter-integrated circuit) o SPI (Serial Peripheral Interface).

## **2. Métodos**

Si se desea construir un sistema de registro de datos flexible y de bajo costo, se puede optar por un diseño basado en un microcontrolador; o bien, basado en una plataforma de hardware libre. El uso de un microcontrolador es una alternativa que presenta el máximo de flexibilidad, pues se puede diseñar el sistema para necesidades muy específicas. Los microcontroladores suelen incluir módulos internos con funciones de conversión analógica a digital y reloj de tiempo real, útil este último para añadir una marca de tiempo a los datos registrados. Sin embargo, los microcontroladores suelen contar con una capacidad limitada de memoria no-volátil para el registro de las mediciones. Por otro lado, la recuperación de los datos requiere del desarrollo de un programa adicional.

Entre las plataformas de hardware que se pueden considerar se encuentran: Arduino, Raspberry Pi (con un costo de 40 dólares americanos), y Beaglebone (Con un costo de 56 dólares americanos). La primera es más económica y más fácil de manejar que las segundas, pues éstas requieren de la instalación y manejo de Linux como sistema operativo. Otra opción es la tarjeta STM32 Nucleo-32 (con un costo de 11 dólares americanos), cuya disposición de pines es compatible con la tarjeta Arduino Nano, y está basada en un microcontrolador ARM de 32 bits; o bien, alguna de las tarjetas Curiosity basadas en microcontroladores de 8, 16 y 32 bits de Microchip, y con un costo a partir de los 30 dólares.

De entre las opciones mencionadas, la plataforma Arduino destaca por su fácil adquisición, programación sencilla, bajo costo, y gran cantidad de bibliotecas de uso libre para el manejo de sensores y módulos diversos. Una de las limitantes de esta

plataforma es la escasa capacidad de depuración del programa en comparación con el resto de las herramientas mencionadas, ya que no es capaz, por ejemplo, de hacer ejecuciones paso a paso.

En este documento se detalla el procedimiento para construir un sistema de medición y registro de datos (*datalogger*) utilizando una tarjeta Arduino Nano (\$160 pesos, para la versión clon), que es una de las tarjetas más económicas de la familia, y está basada en un microcontrolador Atmel ATmega 328P de 8 bits. El código de programa y las conexiones son totalmente compatible con la tarjeta Arduino UNO, ya que ambas utilizan el mismo procesador. Se seleccionó esta plataforma debido a que es de hardware abierto, y cuenta con numerosas bibliotecas para el manejo de sensores, por lo que fácilmente se podrá modificar el sistema propuesto para necesidades particulares. Para complementar el funcionamiento, a la tarjeta se le añadió un módulo de memoria microSD y un módulo reloj en tiempo real (figura 1).

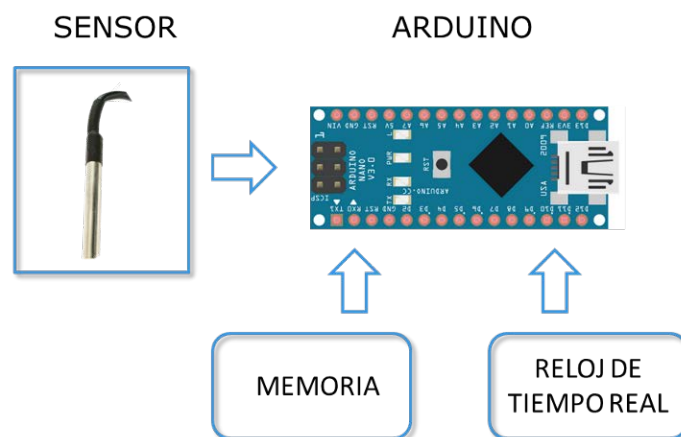


Figura 1 Esquema a bloques del sistema de registro de datos.

Para el almacenamiento de datos se seleccionó un módulo genérico para tarjeta microSD, el cual tiene un costo de \$60 pesos (sin incluir la tarjeta microSD), que proporciona al Arduino una gran capacidad de almacenamiento de datos. No se tuvo ningún problema al utilizar una tarjeta de 8 GBytes. Esto, en comparación con la capacidad de almacenamiento propia de la tarjeta Arduino que es de sólo 1 KByte [Arduino, 2018]. En el mercado es posible encontrar módulos de expansión microSD

originales y clones. En la figura 2 se muestra un ejemplo de ambas versiones. En la tabla 1 se indican la equivalencia de pines entre los módulos. En este caso, el módulo cuenta con pines para su inserción a una tarjeta protoboard.

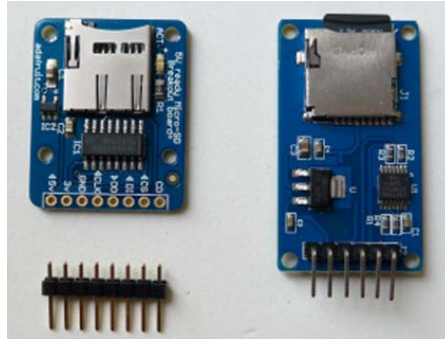


Figura 2 Módulos microSD: Adafruit original (Izquierda) y clon genérico (derecha).

Tabla 1 Equivalencia entre pines de los módulos Adafruit y clon.

Módulo Adafruit	Módulo clon
5 V	VCC
3 V	No existe
GND	GND
CLK	SCK
D0	MOSI
DI	MISO
CS	CS
CD	No existe

Para utilizar el módulo microSD clon se puede partir de la información y las bibliotecas de programación del fabricante Adafruit [Adafruit, 2018]. La comunicación entre la tarjeta Arduino y el módulo microSD utiliza el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), que fue desarrollado para el intercambio de datos entre un microprocesador y módulos periféricos. Este protocolo maneja líneas separadas para envío, recepción de datos (comunicación full-duplex), más una señal de reloj. Por otro lado, el protocolo I<sup>2</sup>C (*Inter Integrated Circuit*), utiliza una sola línea para el envío y recepción de datos [Leens, 2009], [Linke, 2008]. Con el protocolo SPI se puede alcanzar una velocidad de transmisión de 20 MHz, en comparación con 3.4 MHz del protocolo I<sup>2</sup>C [NXP, 2014], [Usach, 2015]. En la tabla 2 se indica una descripción de la función de cada pin del módulo.

Tabla 2 Descripción de la operación de los pines del módulo microSD.

PIN	Función
VCC	Entrada de alimentación +5 Volt
GND	Conexión a tierra
SCK	Señal de reloj
MOSI	Entrada de datos
MISO	Salida de datos
CS	Señal de activación del módulo

Para que la tarjeta microSD pueda ser utilizada por el módulo es necesario que el formato sea de tipo FAT16 o FAT32. Para conectar el módulo microSD a la tarjeta Arduino se utilizó el diagrama de la figura 3. A manera de demostración, al sistema se le ha añadido un sensor de temperatura integrado LM35 [Texas Instruments, 2016], cuya salida de voltaje es equivalente a 10 mV/°C.

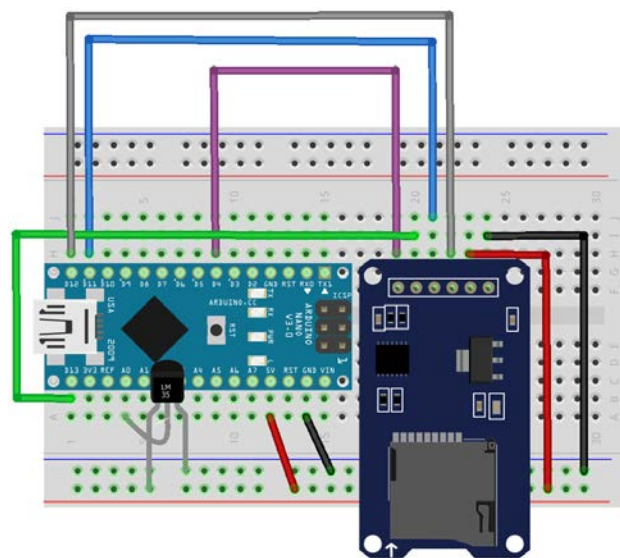


Figura 3 Diagrama de conexiones del módulo microSD, la tarjeta Arduino NANO y un sensor de temperatura LM35.

La conexión entre la tarjeta Arduino y el módulo microSD se hizo de acuerdo con la tabla 3, la cual es compatible con tarjetas Arduino NANO o Arduino UNO. Los pines digitales D11, D12 y D13, no se pueden intercambiar por otros, debido a que se encuentran conectados con el módulo interno de comunicación SPI (pines 15 a 17 del microcontrolador). Por otro lado, el pin digital D4, que controla la señal *Chip Select*, sí se puede intercambiar por otro pin, previo ajuste del código.

Tabla 3 Conexión del módulo microSD a la tarjeta Arduino.

Módulo microSD	Arduino
CS	D4
MOSI	D11
MISO	D12
CLK	D13
VCC	5 V
GND	GND

Utilizando un osciloscopio digital Keysight DSOX1102G (70 MHz, 2 GS/s) se pudo medir la duración del ciclo *loop* (cuando se lee un solo canal) y se estableció que es de aproximadamente 16.3 ms, de tal manera que añadiendo un retardo de 984 ms se podrían obtener datos cada 1000 ms (esto se comprobó con el osciloscopio y se obtuvo que la frecuencia de registro de datos fue de 0.9998 Hz).

El programa de ejemplo que proporciona el ambiente de programación (IDE, *Integrated Development Environment*) del Arduino fue modificado para leer un solo sensor:

```
/* Datalogger_SD_1ch.ino Programa modificado del código de ejemplo.
   Se requieren las siguientes conexiones
   CS -> D4
   MOSI -> D11
   MISO -> D12
   CLK -> D13
   VCC -> 5 V
   GND -> GND
   Debe haber un sensor analógico en el canal A0 */
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 4;
const int analogPin = 0;
int sensor = 0;
void setup() {
  // Inicializa la comunicación serial
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.print("Iniciando tarjeta SD ...");
  // see if the card is present and can be initialized:
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
```

```
Serial.println("Fallo en tarjeta, o no hay tarjeta");
// No hace nada más:
return;
}
Serial.println("Tarjeta lista");
pinMode(7, OUTPUT); // pin testigo
}
void loop() {
  digitalWrite(7, HIGH);
  // make a string for assembling the data to log:
  String dataString = "";
  // lee el sensor y genera una cadena:
  sensor = analogRead(analogPin);
  dataString += String(sensor);
  // Abre el archivo en la memoria SD
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  // Revisa si el archivo está disponible para escribir:
  if (dataFile) {
    dataFile.println(dataString);
  dataFile.close();
  // Envía la cadena también por el puerto serial
  Serial.println(dataString);
  }
  // Si el archivo no se encuentra abierto, manda un error:
  else
  {
    Serial.println("Error al abrir el archivo datalog.txt");
  }
  digitalWrite(7, LOW);

  delay(984); // Toma un dato cada segundo
  //delay(59984); // Toma un dato cada minuto
  //delay(299984); // Toma un dato cada 5 minutos
  //delay(599984); // Toma un dato cada 10 minutos
}
```

Al final del listado se añadió un conjunto de comandos *delay*, los cuales permiten cambiar la velocidad de muestreo entre un segundo; o bien, 1, 5, y 10 minutos.

Una vez que se ha cargado el programa en la tarjeta Arduino comenzará automáticamente el registro de datos en el archivo *datalog.txt*. En esta versión, el archivo de datos no se sobrescribe cada vez que se enciende la tarjeta Arduino, sino que los nuevos datos son añadidos a los ya existentes.

El sistema descrito consume 21 mA de corriente (medidos con un multímetro portátil Fluke modelo 87V,  $\pm 1\%$  de exactitud  $\pm 2$  dígitos), por lo que, si se alimenta con una pila de respaldo de celular de 2,000 mAh de capacidad, teóricamente será posible registrar datos durante 100 hrs (4.16 días). Se hizo una prueba con una pila de respaldo genérica, con las citadas características. Contrario al dato esperado, se encontró que el sistema sólo duró funcionando 44 horas, partiendo de la carga completa, proporcionada por un cargador Panasonic BQ-390 (capacidad: cuatro pilas AA o dos pilas AAA). Este resultado se puede deber a una especificación incorrecta por parte del fabricante, o a una excesiva pérdida de energía debido al convertidor CD-CD interno de la batería, el cual se encarga de convertir el voltaje de 3.7 V de una pila de litio en los 5 V de salida del conector USB (figura 4), donde se observa el convertidor DC-DC (indicado con la flecha roja).

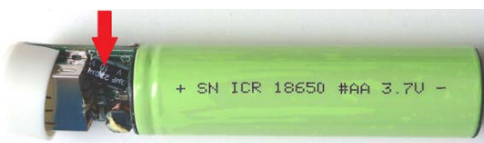


Figura 4 Pila de respaldo de celular genérica).

### Módulo Reloj-Calendario TinyRTC DS1307

Para añadir un reloj-calendarario al sistema, y almacenar cada dato con hora y fecha, se utilizó un módulo TinyRTC [Gizmo, 2016]. Este módulo, que tiene un costo de \$70 pesos, está basado en el reloj de tiempo real (*Real-Time Clock*) DS1307 y cuenta con un socket para una pila de litio de 3 V (CR2032 o similar). La configuración y uso del módulo se realizaron mediante un protocolo serial de comunicación I<sup>2</sup>C, cuyas bibliotecas se encuentran disponibles en la plataforma del Arduino. Un módulo TinyRTC genérico se muestra en la figura 5, y una descripción de sus pines en tabla 4.

Las conexiones entre el módulo TinyRTC y la tarjeta Arduino se enlistan en la tabla 5. La tarjeta Arduino utiliza los pines A4 y A5 para la comunicación mediante el protocolo I<sup>2</sup>C, por lo que no estarán disponibles para su uso como entradas analógicas. Un posible diagrama de conexiones, que incluye el módulo microSD, se muestra en la figura 6.



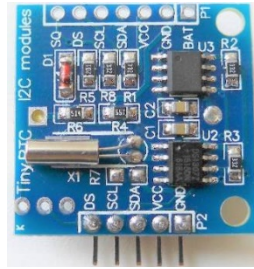


Figura 5 Módulo TinyRTC.

Tabla 4 Descripción de los pines del módulo TinyRTC.

Pin	Función
DS	Línea de datos de un sensor de temperatura DS18B20 (no instalado)
SCL	Reloj
SDA	Datos
VCC	Alimentación +5 V
GND	Tierra

Tabla 5 Conexiones entre el módulo TinyRTC y la tarjeta Arduino.

TinyRTC	Arduino
DS	
SCL	A5
SDA	A4
VCC	5V
GND	GND

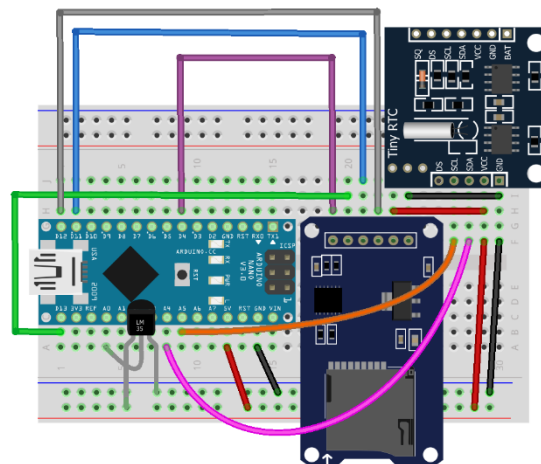


Figura 6 Diagrama de conexiones del módulo TinyRTC, el módulo microSD, la tarjeta Arduino y un sensor de temperatura LM35.

Para utilizar el módulo TinyRTC se requiere la biblioteca RTCLib [Jeelab, 2017]. A continuación se muestra el código que permite realizar una lectura del convertidor analógico-digital cada segundo, a partir de la información del reloj de tiempo real, y almacena cada dato junto con su marca de tiempo en la memoria microSD:

```
//Datalogger_simple2a_60seg.ino
/*
 * Se corrige el encabezado del archivo CSV
 */
#include <SD.h>           //Bibliotecas
#include <Wire.h>
#include <RTCLib.h>
RTC_DS1307 RTC;         // Crea un objeto de tipo reloj de tiempo real
const int chipSelect = 4; //CS pin del módulo
const int analogPin = 0;
String nameFile = "";
File logfile;           //Variable tipo File
void setup() {
SD.begin(chipSelect);
RTC.begin();
Wire.begin();
Serial.begin(9600);
  // create a new file
  char filename[] = "LOGGER00.CSV";
  for (uint8_t i = 0; i < 100; i++) { //Genera el nombre de archivo
    filename[6] = i/10 + '0';
    filename[7] = i%10 + '0';
    if (! SD.exists(filename)) {
      // only open a new file if it doesn't exist
      logfile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
      //logfile.close();
      break; // leave the loop!
    }
  }
  if (! logfile) {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
  }
  Serial.print("Logging to: ");
  Serial.println(filename);
  nameFile = filename;
  logfile=SD.open(filename, FILE_WRITE);           //Will open and will write once just
  for headers
  logfile.println(" Dato, Fecha, Hora"); //Print headers (not saved yet)
```

```
logfile.close();           //Print saved
}
void loop(){
DateTime now = RTC.now();           //Clock call
if(now.second()==0){           //Toma una muestra por minuto
logfile=SD.open(nameFile, FILE_WRITE); //Will open and will write date
now =RTC.now();
String dataString = "";
// lee el sensor y genera una cadena:
int sensor = analogRead(analogPin);
float temp = 500*sensor/1024.0;
dataString += String(temp) + "," + getDate() + "," + getTime();
logfile.println(dataString);           //Print date and time(not saved yet)
logfile.close(); //Print saved
Serial.println(dataString);           //Print date and time(not saved yet)
}
delay(1000);           //Evita más de una lectura en el mismo segundo 00
}
String getTime(void)
{ // Lee la hora del RTC
String returnString = "";
DateTime now = RTC.now();
now =RTC.now();
if (now.hour() < 10)
returnString += "0" + String(now.hour());
else
returnString += String(now.hour());
returnString += ":";
if (now.minute() < 10)
returnString += "0" + String(now.minute());
else
returnString += String(now.minute());
returnString += ":";
if (now.second() < 10)
returnString += "0" + String(now.second());
else
returnString += String(now.second());
return returnString;
}
String getDate(void)
{ // Lee la fecha del RTC
String returnString = "";
DateTime now = RTC.now();
now =RTC.now();
```

```
if (now.day() < 10)
  returnString += "0" + String(now.day());
else
  returnString += String(now.day());
returnString += "/";
if (now.month() < 10)
  returnString += "0" + String(now.month());
else
  returnString += String(now.month());
returnString += "/";
if (now.year() < 10)
  returnString += "0" + String(now.year());
else
  returnString += String(now.year());
return returnString;
}
```

A diferencia del anterior programa, en este último, se cambia automáticamente el nombre del archivo de destino incrementándose de *logger00* a *logger99*, lo cual facilitó la diferenciación de los diferentes registros; además, son compatibles con hojas de cálculo. En la figura 7 se muestra la tarjeta Arduino Nano, junto con los módulos microSD y RTC montados en una tarjeta protoboard.

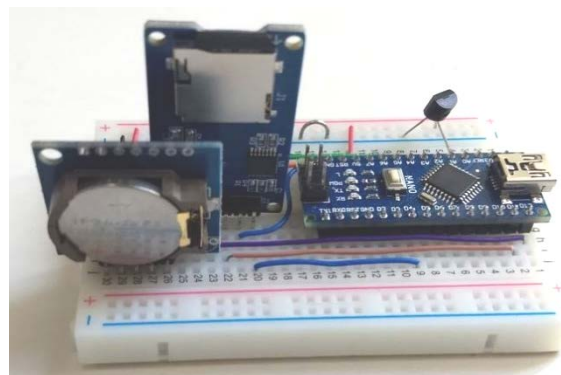


Figura 7 Fotografía del sistema montado en una tarjeta protoboard.

### 3. Resultados

Se construyó un solo sistema de registro de datos. La operación del convertidor analógico-digital de la tarjeta Arduino toma como referencia el voltaje de alimentación; por lo tanto, para evaluar la influencia de la alimentación en su

operación, se probaron cuatro fuentes distintas: una batería de respaldo de celular, un cargador de celular, una fuente de laboratorio y un juego de cuatro pilas recargables AA de NiMH. Las pruebas se realizaron de manera secuencial. En ellas se guardó un dato de temperatura cada minuto, proporcionado por un sensor de temperatura LM35, hasta completar 1000 lecturas. Los datos adquiridos se muestran graficados en la figura 8, las muestras se tomaron secuencialmente y las gráficas se encuentran desfasadas verticalmente para mayor claridad.. Resulta práctico considerar como fuente de energía a una pila de respaldo de celular, debido a la gran capacidad que tienen. Sin embargo, se aprecia que al utilizarla; o bien, al emplear el cargador de celular, las lecturas presentan un nivel de ruido mayor. Esto es debido al convertidor de voltaje CD-CD de tipo conmutado con que cuentan. El nivel de ruido disminuye notablemente al utilizar una fuente de laboratorio de tipo lineal o las pilas recargables, presentándose únicamente el error típico del convertidor analógico-digital ( $\pm 2$  LSB) [Atmel, 2016].

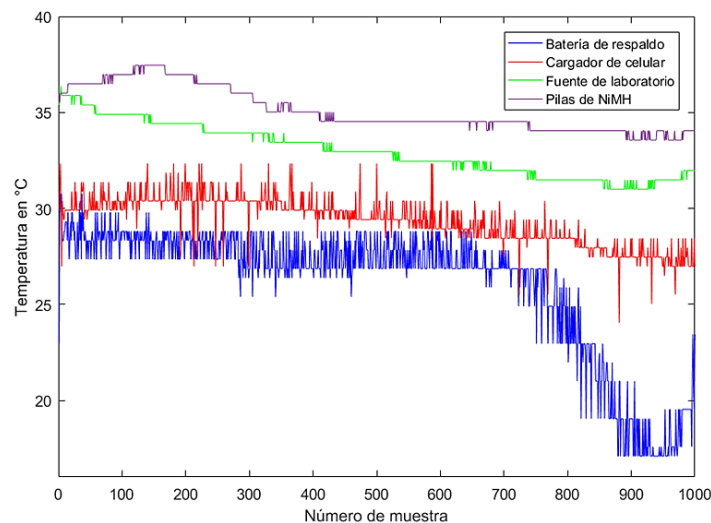


Figura 8 Secuencia de registro del sistema implementado utilizando cuatro tipos de fuentes de voltaje.

#### 4. Discusión

La utilidad de un sistema de registro de datos se basa, además de en una adecuada exactitud en la medición, en el nivel de autonomía. Esto depende de la capacidad de almacenamiento y de la duración del suministro de energía. El uso de

una tarjeta microSD para el almacenamiento de datos en un sistema de registro automático proporciona una capacidad muy alta, donde con facilidad se puede medir la evolución de un proceso por espacio de meses. La limitante es entonces la fuente de alimentación, en especial si se requiere que el volumen o el peso del dispositivo sean reducidos. Para la tarjeta Arduino Nano se midió un consumo de corriente de 21 mA. Este valor puede bajar a 18 mA si se desconecta el LED que indica la alimentación de la tarjeta (PWR), y a 7 mA si se utilizan las funciones de bajo consumo de energía y se activa el modo SLEEP del Arduino. A esto, sin embargo, se le debe añadir el consumo de los módulos microSD y RTC que suman 5.5 mA. Esto deja claro que el sistema tiene capacidades limitadas de ahorro de energía, lo cual se debe fundamentalmente a que no se cuenta con la opción de que el microcontrolador opere a una menor frecuencia que la de 16 MHz con que trabaja por omisión. En estas condiciones, se utilizó un paquete de cuatro pilas recargables tamaño AA de NiMH con una capacidad nominal de 1,900 mAh. Con esta alimentación, fue posible registrar un dato de temperatura cada minuto, con hora y fecha, por espacio de 12 días. El archivo resultante tuvo una extensión de 402 kB. Esto significa que una memoria de 8 GB de capacidad podría contener casi 20 mil experimentos como el indicado. Por otro lado, si no se requiere una gran precisión en la marca de tiempo, es suficiente con utilizar el programa de manejo de la tarjeta microSD, con lo que se simplifica el sistema y se reduce su costo.

Se estima que el costo global del sistema presentado se aproxima a los \$1 200 pesos. Esto incluye además de la tarjeta Arduino y los módulos de memoria y reloj de tiempo-real, el gabinete, una memoria microSD de 8 GB, las pilas, el adaptador para pilas, y el cargador. De esta manera, es posible que para algunas tareas de medición sea posible encontrar un dispositivo comercial más económico.

## **5. Conclusiones**

La tarjeta Arduino Nano constituye una opción económica y de fácil configuración para el desarrollo de múltiples aplicaciones. En este trabajo se presentó el desarrollo de un sistema de medición y registro de datos basado en dicha tarjeta, al que se conectó un módulo de memoria microSD y un módulo de reloj en tiempo real. Como

ejemplo de aplicación se utilizó un sensor de temperatura LM35 y se incluyen los códigos fuente de los programas. Como la tarjeta Arduino Nano no está orientada a aplicaciones de bajo consumo, la duración de los registros está ligada al tipo de fuente de energía utilizada. Sin embargo, fue posible utilizar el sistema por espacio de 12 días, alimentándolo con cuatro pilas recargables AA de NiMH. El sistema es de bajo costo y flexible, ya que se puede reconfigurar para funcionar con una gran cantidad de sensores para los cuales existen bibliotecas de uso libre. Otra ventaja es la fácil recuperación de los datos, ya que se almacenan en una memoria microSD que se puede leer en cualquier computadora personal.

El sistema presentado servirá como base para desarrollar un registrador de datos de humedad y pH en suelos artificiales (tecnosuelos). Se requiere la medición en múltiples puntos, por lo que el bajo costo del sistema desarrollado permitirá construir varios registradores sin que eso represente un presupuesto elevado.

### **Agradecimientos**

Este trabajo forma parte del proyecto PAPIIT DGAPA-UNAM IN108118 Construcción y monitoreo de tecnosuelos con materiales de desecho para la revegetación urbana.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Adafruit. MicroSD card breakout board tutorial. <https://learn.adafruit.com/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial?view=all>, mayo de 2018.
- [2] Arduino. (2018). Arduino Nano. <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>.
- [3] Atmel. (2016). ATmega328/P Datasheet complete. In: Atmel Corporation.
- [4] Design, D. (2014). DLP-IO8-G 8-Channel Data Acquisition Board. <http://www.dlpdesign.com/usb/io8.php>, agosto de 2018.
- [5] Extech (2013). RHT20 Humidity/Temperature datalogger. [http://www.extech.com/resources/RHT20\\_DS-en.pdf](http://www.extech.com/resources/RHT20_DS-en.pdf), agosto de 2018.
- [6] Gizmo. (2016). TinyRTC I2C Module. Gizmo Mechatronix Central. 6 págs.
- [7] Jeelab. (2017). RTC Library. <https://github.com/adafruit/RTCLib>, junio de 2018

- [8] Leens, F. (2009). An introduction to I<sup>2</sup>C and SPI protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(1), 8-13. doi:10.1109/MIM.2009.4762946.
- [9] Linke, B. (2008). Overview of 1-Wire Technology and its Use. <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1796>, agosto 2018.
- [10] NXP. (2014). I2C-bus specification and user manual. NXP Semiconductors.
- [11] Onset. (2016). HOBO U12-013 data logger. <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-013>, agosto de 2018.
- [12] Texas Instruments, Inc. (2016). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Texas Instruments Inc. 31 págs.
- [13] Usach, M. (2015). AN-1248 Application Note. SPI Interface. Analog Devices Inc. 8 págs.



# **LEARNING CONTENT MANAGEMENT SOFTWARE PERSONALIZED FOR A UNIVERSITY ENVIRONMENT**

## *SOFTWARE DE ADMINISTRACIÓN DE CONTENIDOS DE APRENDIZAJE PERSONALIZADO PARA UN AMBIENTE UNIVERSITARIO*

### **Aldonso Becerra Sánchez**

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*a7donso@uaz.edu.mx*

### **Gustavo Zepeda Valles**

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*gzepeda@uaz.edu.mx*

### **Alexandro Iván Pérez García**

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*alexandro20.0@icloud.com*

### **Uriel Ramírez-García Correa**

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*uramirezgc@uaz.edu.mx*

### **Santiago Esparza Guerrero**

Universidad Autónoma de Zacatecas  
*chago@uaz.edu.mx*

## **Abstract**

The use of content management systems (better known as e-learning platforms) among universities is a key element in today's educational approaches. Nevertheless, common content managers found in the web aren't always the best option, given that they do not offer a personalized integration to satisfy the necessities of individual institutions, or they simply lack in fundamental areas, which leaves the necessities of both professors and students unsatisfied. Our proposal focuses on the design and implementation of a content management system integrated into the higher education environment, which takes into account the use of an academic model being utilized within our academic institution (Universidad Autónoma de Zacatecas), making emphasis in the interaction of both the students

and professors with the system. This brings forward uniformity throughout the institution. It is projected that the system will enable students a better academic control, displaying performance statistics throughout the academic year, making time management easier for each of their activities.

**Keywords:** Content manager, e-learning platform, mobile app, schedule manager, school system

## **Resumen**

*El uso de software gestor de contenidos en las universidades es un elemento necesario en la educación actual. Sin embargo, los gestores de contenidos disponibles en la red no siempre son la opción más idónea, dado que no ofrecen una integración personalizada a las necesidades de cada institución, o resultan ser obsoletos en áreas trascendentales, dejando de satisfacer los requerimientos prácticos de los estudiantes/profesores. La presente propuesta está enfocada en el diseño y desarrollo de un software gestor de contenidos integrado al entorno universitario, que tome en cuenta el uso del modelo académico empleado dentro de la institución correspondiente, haciendo hincapié en la interacción del alumno/profesor con el sistema. Este hecho brinda uniformidad a través de la institución. También se tiene contemplado que el software permita al estudiante un mejor control académico, mostrándole su desempeño conforme se avanza, facilitándole la administración del tiempo que da a cada actividad programada.*

**Palabras Claves:** *Administrador de contenidos, aplicación móvil, agenda escolar, plataforma e-learning, sistema escolar.*

## **1. Introduction**

To better understand the developed system is necessary to understand what a learning platform is. A learning platform is a software application that gives teachers, students, parents and administrators access to common resources, communication tools, and information, not just within the school but outside it too [Itslearning AS, 2011], this can be accomplished with the use of web and mobile applications that provide both the student and the professor with the necessary

tools to make academic life simpler, this is accomplished by allowing for the creation and submission of assignments such as homework, projects, test, etc., in an easy and convenient way. As of the writing of this paper, our academic institution makes use of the e-learning platform known as Moodle, having different versions of the platform depending on the Academic Unit. This gives a sensation of unconformity and incongruence for the students who move through different Academic Units, who have to create different accounts for each academic program and their learning platforms. This type of problems only grows in intensity when the platforms are different, where both the student and the professor have to make use of more than one of this platforms in order to carry out his/her everyday activities. A clear example of this would be a professor who imparts classes in two different Academic Units, each of them making use of their own platform. In this type of cases, the professor would be required to manage two accounts (one for each platform), this not only becomes bothersome but also problematic, given that this type of situation would make it troublesome for the professor to keep an accurate record of each student's progress. Now imagine a student in similar circumstances, taking courses in distinct colleges, having to be conscious of each assignment in different platforms with different graphical interfaces and a completely different User Experience (UX).

The Learning Content Management Systems (LCMS) are applications designed primarily to support these academic tasks, however, many of them have no particularities and personalization in the environments where they are applied, some examples of these systems are WebCT, eCollege, Desire2Learn, Moodle, ATutor, Dokeos, Claroline, Sakai, LRN.

With the technological evolution in the educational field, new modalities have emerged with the use of information and communication technologies such as [Ramirez, 2011]:

- E-learning: Education and training through the Internet.
- B-learning: A mixed model that requires distance and face-to-face education.
- M-learning: The E-learning educational modality that is supported by mobile devices and wireless transmission.

These types of education require the support of a technological platform to manage virtual learning environments. Learning Management System (LMS) are these web-based software web applications that are used to plan, implement and evaluate learning processes related to online management and training in order to achieve superior academic and work performance.

Learning Content Management System is a software application that allows managing virtual learning environments with respect to educational content, didactic resources and both synchronous and asynchronous activities. Among these activities, the most representative are online evaluation, management, distribute and control users (teachers, students, administrators) in terms of enrollment, de-enrollment, and group management. Allowing users to follow up on their learning and teaching process through the user activity reports generated by the software system. The Learning Content Management Systems can be mainly of two types [Fernández, 2009], [Ramírez, 2011]:

- Proprietary systems. For instance, Blackboard-WebCT, eCollege, Desire2Learn.
- Open-access systems: For instance, Moodle, ATutor, Dokeos, Claroline, Sakai, LRN.

WebCT (Web Course Tools) is a commercial system of online virtual learning, which is used mainly by educational institutions for learning through the Internet. The flexibility of the tools for the design of classes makes this environment very attractive for both beginners and experienced users in the creation of online courses. In this sense, some research works have measured the reception and attitude of students towards the use of the WebCT virtual platform as a complement to face-to-face teaching in the Biotechnology Processes and Products subject of the Biotechnology Degree [Martín, 2010]. From the point of view of the teacher, the virtual platform led to greater interaction not only between teacher-student (through possible virtual tutorials) but also between student-student.

On the other hand, Atutor is an open-source on-line LCMS based on Web, and it has nice adaptability and utility. Tutors can assemble the courses on Web

immediately; they can also obtain and input packed courses easily and manage their on-line courses as well. Students are able to study under an adaptable circumstance. Atutor can easily set up course management platform. With the help of powerful, easily operating Atutor, we can save time, effort and money to set up a good online course management platform. It provides an effective supporting role for general course management staff. On the atutor platform, if the user has the super administrator's or teacher's permission, he can build up his own on-line course according to the actual demands [Jiugen, 2011].

The online learning platform, Moodle (Modular Object Oriented Dynamic Learning Environment), is presented as a software that offers the tutor, free of charge and without physically replacing it, some instruments that sustain and enrich their face-to-face classes [Ontoria, 2013]. One of the main features of this LMS is that it offers the possibility of inserting multimedia content: the teacher can upload images (photos, illustrations, graphics); videos (dynamic presentations, advertisements, short and feature films, documentaries, television news, television programs, trailers, video clips); and audio content (music, dialogues, radio programs). Due to the importance of sensory stimuli in teaching, the inclusion of multimedia elements in a Moodle course is essential to encourage motivation.

In terms of LMS designed with more particularities and focused on university principles, VirtualMed [Dominguez, 2007] is a open-use application encoded in PHP that uses MySQL as Database Manager. It has all the basic tools to be considered a content manager, such as: communication tools, performance, administration and productivity; as well as a friendly Web interface that supports the development of various forms of teaching organization. It can be installed in an educational intranet, with the aim of ensuring, maintaining and improving the quality of the educational teaching process, guaranteeing the conservation, transfer and reuse of knowledge; allows thus to take advantage of the advantages offered by technological development to all vital processes of scientific-technical development. The developed system presented in this paper solves most of this problems in a more useful way for both the student and the professor and even the academic institution, this by becoming more attached to the daily routine of the

student, providing him/her with the necessary instruments in order to stay aware of assignments and making communication with the professor something natural. In a similar way, it facilitates the professor the ability to manage and control all of the courses designated to him/her, even if they are under different colleges. Although undoubtedly one of the biggest incrustations of the proposed work is the version of the software for mobile devices with characteristics of alerts to the students of their activities, tasks, jobs, suspensions of classes and changes in schedules. In this scheme the student will have the ability to detect by himself the weak areas that she/he has and receive a personalized and autonomous support through intelligent models. The software project is still in the development stage in some modules and in the testing stage in another, so efficiency validation mechanisms at the user level are not yet available. It is hoped that in the medium term this information will be obtained to validate the operation and effectiveness of the application.

## **2. Methods**

### **Development**

For the present project, the following requirements were taken into account:

- Must be a unique system within the university.
- Must be easy to use.
- Must provide a uniform UX experience throughout all the different Academic Units within the institution.
- Must provide a schedule/agenda linked directly to the student's courses and activities.
- Must be able to provide the student's record and progress to both the student and the professor.
- When there is an assignment such as a homework or project the student must be able to submit files to it, marking the assignment as complete.
- The system must be able to provide with mobile interfaces (apps) for iOS and Android as well as a web interface.
- The server must be able to escalate given the size of most academic institutions.

With these necessities, we decided to make use of the following technologies:

- Django & Django REST Framework [Django, 2018]; [Django REST, 2018]; [Geary & Horstmann, 2010].
- Python [Oliphant, 2007].
- Angular 5 [Angular, 2018].
- TypeScript [TypeScript, 2018].
- Ionic Framework [Ionic, 2018].
- Nginx [Nginx, 2014].

Each one of these technologies has their own advantages as well as their own jeopardies, nevertheless, we decided for them given the vast improvements they bring to the development of the system.

### **Development methodology**

An agile methodology commonly known as Prototyping was chosen for the development of this system, this methodology is defined as a System Development Method (SDM) in which a prototype (an early approximation of the final system or product) is built, tested and then re-worked depending on how necessary it may be until we reach an acceptable prototype, on which a complete system or product can now be developed on top of [Rouse, 2005]. This type of model allows us for a feedback from some of the interested parties in early stages, these results on system features being discarded or suppressed while new functionalities and necessities were added as they were needed. For this specific project, we define a prototype as a system/software being used with demonstration purposes on a specific topic, testing its defined functionality in design so that we can have a better understanding of the problem to resolve. The prototype concept is defined as a preliminary version, intentionally incomplete or reduced of a system [Weitzenfeld, 2007]. Under this premises, the use of prototypes is a useful tool to apply to almost all activities of software design and creation.

For a more technical approach to our system, our prototypes are based on the design and requirement specifications under the following assumptions:

- Requirement gathering: is generated based on information provided by the user that needs or requires aid from a software tool.
- Requirement validation: The developed prototype is required to show and prove (if necessary) missing functionality according to the requirements obtained in stage 1.

Our prototyping focus follows the process indicated by figure 1. This procedure is repeated on each iteration [Sommerville, 2001]:

1. Establish prototype objectives.
2. Define prototype functionality.
3. Develop prototype.
4. Evaluate prototype.

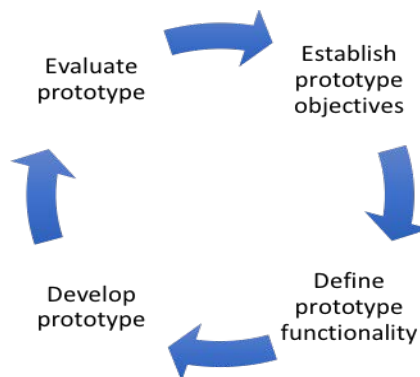


Figure 1 Prototype life cycle.

During the establishment of the prototype objectives, our main goal was to select one of the expected functionality to develop and determine how far the prototype would reach in terms of functionality. This task required from us a careful examination of the features that were required to be evaluated by the end user for their approval or dismissal. Each one of these steps allows us to make adjustments to the project even before a final product is shipped or built, nevertheless, this brings to the table its own risks and limitations. A risk that we had to face was the continuous change on requirements, given that none of the involved parties had a clear idea of how some of the functionality in the system should behave and there forward how it should be incorporated to the academic environment.



With the purpose of introducing the proposed application, figure 2 shows the functional architectural of the system Astrum. We choose the codename Astrum for the project given the anecdotal star some student gets when they do a nice job. At the moment both students and professors use the web client in order to interact with the system. This client was developed using Angular/Ionic in its most recent version. Aside from a few other common technologies (such as JQuery, bootstrap and Font Awesome, etc.) no special toolkit was used.

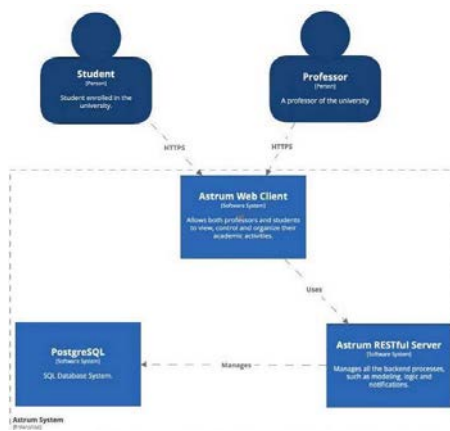


Figure 2 Functional architecture of astrum system.

This client, being only a shell, is not able to perform any operations by itself, it relies on the RESTful Server to provide all the information it needs, this way, when the mobile application is finished the same REST API can be reused.

The RESTful Server was build using Django. Its main functionality is providing all the logic of the system through a simple and consist REST API. In order to make development easier another library/framework (derived from Django) was used, this is the Django rest framework. This framework provides an easy way of creating REST APIs and parsing data. The RESTful Server is stateless, so all the data is stored in a database server with PostgreSQL serving as the Database Manager.

### 3. Results

The Astrum system modules contemplated so far cover those shown in figure 3. The three main areas of the system cover administration (performed by the site

administrator), teaching (dedicated for use by instructors) and learning (focused for students). The modules with dark background mean elements in test phase (already developed modules). The modules with white background involve elements that are still in the development stage; while the modules with white background but with a red line represent modules that are characteristic of this system, since they focus on activities that are not integrated into the LCMS systems of related works. These last models are what distinguish our system. The idea is to support students understand the topics of a subject they do not understand well and help them in a personalized way through specific didactic tools and with case-based reasoning approach and autonomous agents (intelligent multi-agent system).

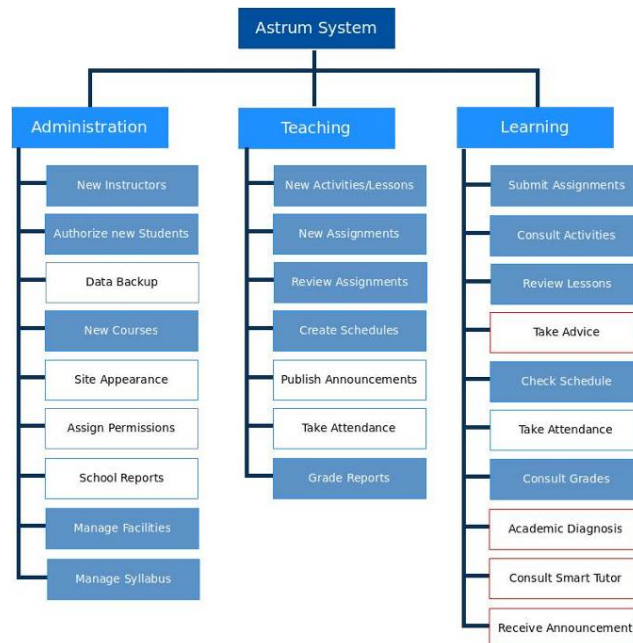


Figure 3 Astrum system modules.

It was decided that the functionality of the Web App would be reduced in comparison to the functionality found in the mobile application (which is still under development). Therefore, the web app would only be focused on administrative tasks, figure 4 shows one of the CRUDs (Create, Read, Update and Delete) of the system, likewise, it is possible to get a glimpse of the school agenda for the student (figure 5) which both a professor and a student can have a look upon.

In addition, figure 6 (in complement with figure 7) shows a part of the menu observed in the web application, making reference to the options institutions have over the system, such as managing Academic Units (colleges), Classes, Courses, Study Plans and Classrooms found within itself.

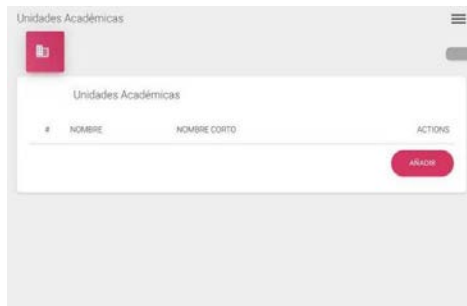


Figure 4 CRUD for academic units (colleges).

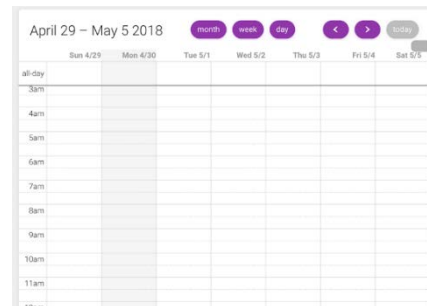


Figure 5 Agenda view on the Web App.



Figure 6 Menu for Institutions on the Web App.

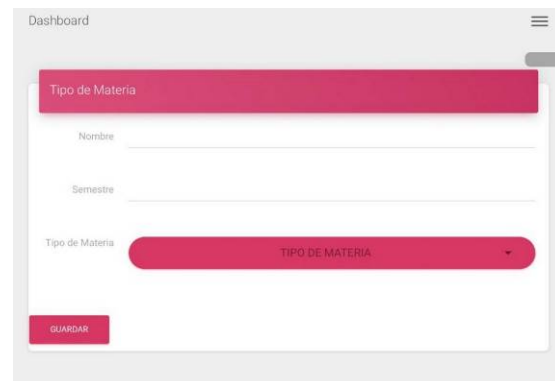


Figure 7 Course creation view.

Currently, the system has a database under the scheme shown in figure 8. This database has suffered some major changes over the course of the development of this system, differing greatly from our original conception. We expect the database to continue growing and getting more complex given the essence of the project. This database accounts for data from system users, permissions, professors, schools (colleges), courses, classrooms, study plans, classes, assistance, score tracking and assignment of homework.

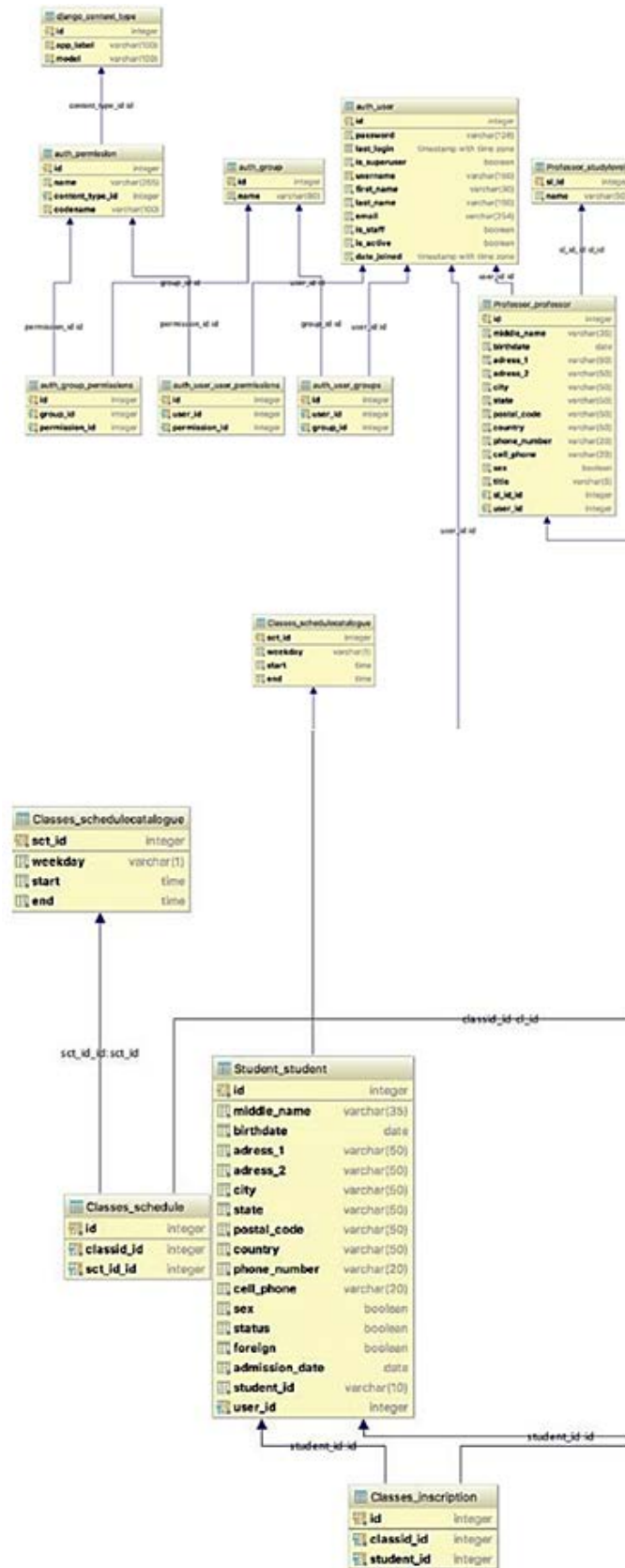


Figure 8 Database scheme.

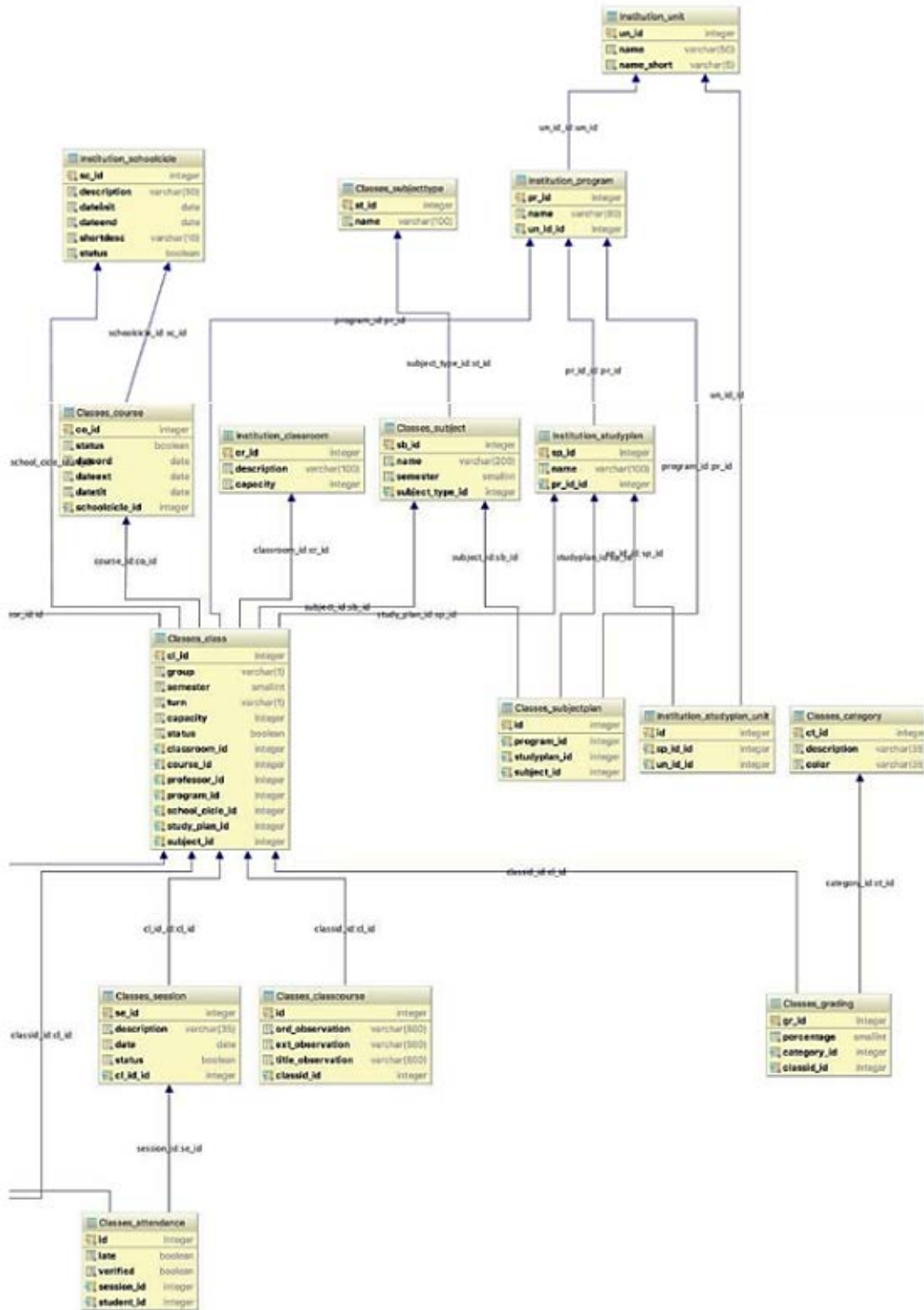


Figure 8 Database scheme (continued).

## 4. Discussion

At the moment, the system is in the testing phase with the modules currently developed. The idea is to continue carrying out feedback work as this beta version is being used. With the time it has in operation, it is not yet possible to determine a set of data that provides information regarding its effectiveness or radical benefits of the system. The one-year projection of the system will allow us to obtain a reliable set of data to analyze and visualize the real areas of benefit and the weaknesses to be corrected.

Under the working framework of the functionality of prototypes presented in this section, we must remember and take into account the portability and considerations of future changes in every software design and development [Weitzenfeld, 2007], which is represented in table 1. The "interfaces" represent the graphical elements, the "functionality" hold the business rules (user requirements), the "data" and "functions" are the equivalent to internal behaviors used to describe "objects" (corresponding to the basic data structures of object-oriented programming), meanwhile the "information" outlines the problem domain of the application. It is important to highlight that the system's architecture must distinguish between elements with higher and lower probability of change. As well, the development of the software system must contemplate a model of processes in which the components with greater change probability do not "drag" more stable elements. Thus, the functionality catalog and tools provided by the shown prototype(s) produce a constant change in their design to better conform to the changing moments in the in-person and virtual (online) approach.

Table 1 Probability of further changes in the software according to the type of design element.

<b>Element</b>	<b>Change probability</b>
Interfaces	High
Functionality	High
Data	Medium
Functions	Medium
Objects	Low
Information	Low

## **5. Conclusions**

Although a challenging project at its early stages given the low understanding and knowledge of the team in certain fields and technologies, the benefit far exceeds the challenges encountered, both for the system and the development team. The system is expected to have extensive integration within our alma mater, given that it's based mostly on our alma mater's structure and its daily routines.

Although there is still much left to do, the general idea of the system is more clear now compared to what was expected at the beginning, and it's our hope to be able to add more functionality in the following iterations. We are expecting a progressive deploy within the university. This will allow us to make adjustments to the system depending on the necessities or unconformities that arise.

The system's growth will be based in the requirements of the academic staff of the institution, but more importantly, it will be focused on the needs brought forward by the students, who are the beneficiary of most of the system's qualities.

## **6. Bibliography and References**

- [1] Angular. What is Angular? Consultado el día 29 de abril de 2018. Dirección web: <https://angular.io/docs>. 2018.
- [2] Django. Django, the Web framework for perfectionists with deadlines: <https://www.djangoproject.com/>, 2018.
- [3] Django REST. Django REST Framework: <http://www.django-rest-framework.org/m>, 2018.
- [4] Dominguez J., y Fresno C. VirtualMEd: un sistema gestor de contenidos de aprendizaje para la universalización de la educación superior. ACIMED, No. 15, Vol. 1, 2007.
- [5] Fernández-Pampillón, A. M. Las plataformas e-learning para la enseñanza y el aprendizaje universitario en Internet. In *Las plataformas de aprendizaje. Del mito a la realidad*. Biblioteca Nueva, Madrid, 2009.
- [6] Itslearning AS. The 12 key benefits of learning platforms. How learning platforms support the business of teaching and learning: [https://www.ttu.ee/public/h/haridustehnologiakeskus/img/12\\_reasons\\_web\\_final-3.pdf](https://www.ttu.ee/public/h/haridustehnologiakeskus/img/12_reasons_web_final-3.pdf), 2011.

- [7] Geary, D., & Horstmann, C. S. Core JavaServer Faces. Prentice-Hall. New Jersey, EUA. 2010.
- [8] Ionic. The top open source framework for building amazing mobile apps: <https://ionicframework.com/framework>, 2018.
- [9] Jiugen Y., Ruonan, X. y Luyao, Y. The Application of the Atutor Learning Content Management System in Teaching. 5th International Conference on Distance Learning and Education, 2011.
- [10] Martín, M. A. La plataforma virtual webct como complemento de la docencia presencial en la asignatura procesos y productos biotecnológicos. Jornadas sobre Innovación Docente y Adaptación al EEES en las Titulaciones Técnicas. 171-174, 2010.
- [11] Nginx. Modules reference: <https://www.nginx.com/wp-content/uploads/2014/03/nginx-modules-reference-r3.pdf>, 2014.
- [12] Oliphant, T. Python for Scientific Computing. Computing in Science & Engineering. No. 9, 10-20, 2007
- [13] Ontoria, M. La plataforma Moodle: características y utilización en ELE. XXIV Congreso Internacional de la ASELE, 2013.
- [14] Ramírez, M. Gestión de los Sistemas de Gestión de Aprendizaje: <https://milagrosrp.wordpress.com/2011/10/24/gestion-sistemas-gestion-aprendizaje/#comments>. 2011.
- [15] Rouse, M. What is Prototyping Model?: <https://searchcio.techtarget.com/definition/Prototyping-Model>, 2005.
- [16] Sommerville, I. Software engineering. Addison-Wesley. Boston, USA. 2001.
- [17] TypeScript. TypeScript: Notes for Professionals: <https://goalkicker.com/TypeScriptBook2/>, 2018.
- [18] Weitzenfeld, A., & Guardati, S. Capítulo 12: Ingeniería de software: el proceso para el desarrollo de software. Libro: Introducción a la Computación. CENGAGE Learning. México, D.F. 2007.



# **ESTIMACIÓN DE RADIOENLACE PUNTO A PUNTO DE UN MINI VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

## *POINT TO POINT RADIO LINK ESTIMATION OF A MINI UNMANNED AERIAL VEHICLE*

**Andrés Calvillo Téllez**

Instituto Politécnico Nacional  
*calvillo@citedi.mx*

**José Cruz Núñez Pérez**

Instituto Politécnico Nacional  
*nunez@citedi.mx*

**Antonio Gómez Roa**

Universidad Autónoma de Baja California  
*gomez\_roa@uabc.edu.mx*

**J. R. Cárdenas Valdez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana  
*jose.cardenas@tectijuana.edu.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se presenta un método de predicción del margen de desvanecimiento de la propagación de ondas de radio y el máximo rango, entre un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y una estación de control terrena. El rango de comunicación está sujeto, a la normatividad de las regulaciones gubernamentales, que determinan el uso de la banda de frecuencia de 900 MHz, industrial, científico y médica, y restringen la cantidad de energía de la potencia isotrópica radiada efectiva a 36 dBm en esas frecuencias. El procedimiento de predicción se realizó en tres pasos. En primer lugar, se obtienen los datos de telemetría del UAV como altitud, latitud y longitud. Como segundo paso se calcularon: la distancia, los ángulos azimutales, y el libramiento del 60% de claridad de la zona de Fresnel, sobre la línea de vista del radioenlace. Finalmente se determinaron: las pérdidas por propagación en el espacio libre, nivel de recepción de la señal y el margen de desvanecimiento de la señal por condición climática, terreno y curvatura de la tierra. Los resultados

muestran que, a partir de la obtención del máximo rango, los parámetros de diseño, el presupuesto del enlace, el análisis de rendimiento, y el margen desvanecimiento, son aceptables para la viabilidad del radioenlace y mejor desempeño del dron.

**Palabras Claves:** PIRE, radioenlace, vehículo aéreo no tripulado, zona de fresnel.

## **Abstract**

*This paper presents a method of predicting the fade margin of radio wave propagation and the maximum range, between an unmanned aerial vehicle (UAV) and an earth control station. The communication range is subject to the regulations of the governmental laws, which determine the use of the frequency band of 900 MHz, industrial, scientific and medical, and restrict the amount of energy of the effective radiated isotropic power to 36 dBm frequencies. The prediction procedure was carried out in three steps. First, you can get the UAV telemetry data as altitude, latitude, and longitude. As a second step to calculate: the distance, the azimuthal angles, and the clearance of 60% clarity of the Fresnel zone, on the line of sight of the radio link. Finally, it was determined: the percentage of propagation in the free space, the level of reception of the signal and the margin of fading of the signaling by climatic condition, the terrain and the curvature of the earth. The results showed that from obtaining the maximum rank, the design parameters, the budget of the link, the analysis of performance, and the margin of improvement, are acceptable for the viability of the radio link and the best performance of the drone.*

**Keywords:** EIRP, fresnel zone, radio link, unmanned aerial vehicle.

## **1. Introducción**

Los drones son aeronaves no tripuladas (UAV) las cuales se controlan por un mando remoto mediante conectividad inalámbrica en la banda de 900MHz son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica [Belal, 2016]. Los UAV son un instrumento emergente de investigación, importante en aplicaciones relacionadas a ciencias de la tierra, mar, agricultura, clima, vigilancia, búsqueda y rescate entre otras [Andersen, 1995]. Para realizar estas tareas y maximizar el

rango del enlace de comunicación entre el UAV y la estación terrena se debe de garantizar una comunicación libre de interferencia que sobrepase la sensibilidad del receptor comúnmente establecida por un margen mínimo en dBm. Sin embargo, los radioenlaces experimentan pérdida de señal cuando el UAV vuela a más de 15 km y una altitud de 500m [CCIR, 1990]. La importancia del estudio de propagación reside en el progreso de los servicios de comunicación que mediante la descripción de modelos precisos puedan predecir la pérdida de señal [Dalbakk, 2014], [Bertoni, 1994]. En la estimación del radioenlace, al restar la sensibilidad especificada del receptor del nivel de señal recibida, se determina hasta qué punto se pueden tolerar las pérdidas de trayectoria, así como el desvanecimiento de la señal, antes de que afecte el rendimiento del sistema. Donde la sensibilidad del receptor especifica la potencia mínima de entrada de radiofrecuencia requerida para recuperar la señal de salida utilizable [Campbell, 2016]. La Norma Oficial Mexicana NOM-121-SCT1-2009 establece las condiciones técnicas de operación para un sistema de radiocomunicación que utiliza el espectro radioeléctrico en la banda de frecuencias en el rango de 902-928 MHz. Dicha banda establece la potencia máxima de transmisión entregada a las antenas de los sistemas la cual no debe exceder de 1 W. En este tipo de enlace se utiliza antenas de transmisión con ganancia direccional máxima de 6 dBi, con el fin de obtener una potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) máxima de 4 W o 36 dBm. Con antenas de ganancia direccional mayor a 6 dBi, la potencia total de entrada y su densidad de potencia, deberán ser reducidas en la misma cantidad que la ganancia direccional establecido por los 6 dBi.

## **2. Métodos**

En esta sección, se revisan algunos modelos teóricos, empíricos y de pérdida de trayectoria específicos del terreno. Los modelos de muestra revisados incluyen, el modelo de pérdida de ruta de espacio libre. Estos modelos revelan que la pérdida de ruta aumenta a medida que aumenta la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.

El trabajo se divide en tres secciones la primera se enfoca en incluir los datos de las antenas propuestas, después se estima el libramiento de la primera zona de Fresnel

al 60% de claridad y el desempeño del radioenlace basado en la potencia del transmisor, las ganancias de las antenas y las pérdidas asociadas, así como la atenuación por propagación en el espacio libre. En este trabajo se dibuja un perfil de radioenlace entre dos puntos terrestres y se muestra el libramiento del 60% de la primera zona Fresnel, además de obtener la gráfica de desempeño considerando el factor climático y rugosidad del terreno mostrando el análisis de pérdidas, ganancias potencia, sensibilidad del receptor, el nivel de PIRE, atenuación debido a la propagación en la trayectoria, el nivel de recepción de la señal y margen de desvanecimiento. En este trabajo se reporta la caracterización del radioenlace para un análisis en la región de Tijuana, México [Freeman, 1997], [Doble, 1996]. El rango máximo se calcula a partir de las coordenadas geográficas de cada punto del radioenlace y se expresan en base a las ecuaciones 1 a 4 [Hall, 1996], [ARRL, 1990]:

$$d_{[km]} = 1.609\sqrt{h^2 + v^2} \quad (1)$$

$$h = (X_1 - X_2)[68.962 + 0.04525Y_m - 0.01274Y_m^2 + 0.00004117Y_m^3] \quad (2)$$

$$v = (Y_1 - Y_2)[68.712 - 0.001184Y_m + 0.0002928Y_m^2 - 0.000002162Y_m^3] \quad (3)$$

$$Y_m = \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (4)$$

Donde:

$d$  = distancia de separación.

$h$  = distancia horizontal.

$v$  = distancia vertical.

$X_1$  = Longitud del primer sitio en grados decimales.

$X_2$  = Longitud del segundo sitio en grados decimales.

$Y_1$  = Latitud del primer sitio en grados decimales.

$Y_2$  = Latitud del segundo sitio en grados decimales.

Es este caso se propone el enlace en las coordenadas geográficas de los puntos A (Centro de Convenciones de Tijuana) y B (Isla Coronado) las cuales son:

- Punto A: 32° 23' 17" Latitud Norte, 117° 03' 35" Longitud Oeste.

- Punto B: 32° 23' 37" Latitud Norte, 117° 14' 20" Longitud Oeste.

Si se sustituyen los valores en la ecuación 4 se obtiene una distancia 16.86 km. El ángulo azimut que existe entre dos puntos se toma como referencia el polo Norte (0°) en el sentido de las manecillas del reloj como lo ilustra la figura 1.

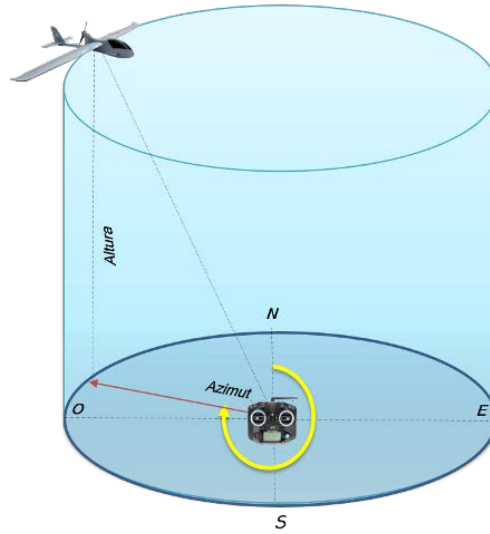


Figura 1 Medición del ángulo del azimut.

El ángulo azimutal de una línea es el ángulo horizontal medido en el sentido de las manecillas del reloj a partir de un meridiano de referencia, que se expresa por la ecuación 5 [ARRL, 1990].

$$\cos(C) = \frac{\text{sen}Y_2 - \text{sen}Y_1 \cos(d / 111.11)}{\cos Y_1 \text{sen}(d / 111.11)} \quad (5)$$

Donde:

$C = \text{ArcCos}(C)$ , para la orientación respecto al norte.

Orientación efectiva respecto al norte, se deduce considerando el criterio si  $X_1 > X_2$  entonces  $Az = C$  y si  $X_1 < X_2$ , entonces  $Az = 180^\circ + C$ . Para el caso en cuestión, al evaluar el punto A y B se obtiene  $C = 92.14^\circ$  y dado que  $X_1 > X_2$ , se tiene que  $Az(A) = 92.14^\circ$ .

En base a los mismos cálculos en dirección de B a A se obtiene  $C = 92.14^\circ$  y dado que  $X_1 < X_2$ , entonces  $Az(B) = 180^\circ + 92.14^\circ = 272.14^\circ$

La claridad de línea de vista, se considera la altura resultante debido a la curvatura de la tierra, que se expresa en la ecuación 6, la altura del obstáculo y una altura mínima correspondiente a un 60% de la primera zona de Fresnel, se determina en la ecuación 7. Lo anterior se representa en la figura 2, donde  $h_o$  es altura del obstáculo,  $h_{Tx}$  la altura de la antena transmisora y  $h_{Rx}$  la altura de la antena receptora, expresada en metros.

$$hct = \frac{0.078d1 \cdot d2}{K} \quad (6)$$

$$F1 = 17.32 \sqrt{\frac{d1 \cdot d2}{f \cdot d}} \quad (7)$$

Donde:

$hct$  = Altura debido a la curvatura de la tierra [m].

$d1$  = Distancia del transmisor al obstáculo [km].

$d2$  = Distancia del obstáculo al receptor [km].

$K = 4/3$ , factor de curvatura de la tierra.

$F1$  = Radio de la primera zona de Fresnel [m].

$f$  = Frecuencia de operación [GHz].

$d = d1 + d2$ , separación entre sitios [km].

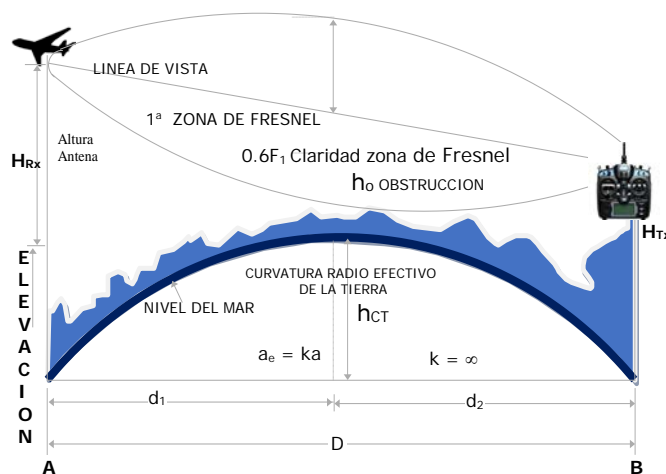


Figura 2 Trayectoria con un libramiento del 60% de claridad de la primera zona de

Fresnel con base en el primer obstáculo.

La altura mínima por la que debe pasar la línea de vista en el punto donde se encuentra ubicado el obstáculo que resulta de la suma de las alturas mencionadas y que se expresan en la ecuación 8.

$$Avl = ho + hct + 0.6F1 \quad (8)$$

Para el caso en estudio, el obstáculo se encuentra ubicado a 8 km del transmisor y con una altura de 0m SNM, por lo que los datos en la implementación son:  $d1 = 8 \text{ km}$ ,  $d2 = 8.8 \text{ km}$ ,  $d = 16.84 \text{ km}$ ,  $hct = 15 \text{ m}$ ,  $ho = 280 \text{ m}$ ,  $F1 = 37.4154762988081 \text{ m}$  y de la ecuación 8 se deduce  $Avl = 240 \text{ m} + 2.47 \text{ m} + 22.4492857792848 \text{ m} = 286.33 \text{ m}$ . La línea de vista debe pasar 6.33 m por encima del obstáculo a fin de lograr una recepción de señal apropiada.

Para la altura de antenas existe una relación entre la distancia de separación entre antenas y sus alturas correspondientes y se observa en la ecuación 9.

$$d = \sqrt{17h_{Tx}} + \sqrt{17h_{Rx}} \quad (9)$$

Donde:

$h_{Tx}$  = altura de antena transmisora [m],

$h_{Rx}$  = altura de antena receptora [m].

Por lo que se propone una altura para  $h_{Tx}$ , y se deduce  $h_{Rx}$  para conocer la altura requerida, como se observa en la ecuación 10.

$$h_{Rx} = \frac{(d - \sqrt{17h_{Tx}})^2}{17} \quad (10)$$

En este caso dado que  $d = 16.8 \text{ km}$  y la altura  $h_{Tx} = 500 \text{ m}$  de modo que  $h_{Tx} = 15 \text{ m}$  y  $h_{Rx} = 500 \text{ m}$ . Para calcular el ángulo de elevación se requiere conocer la altura SNM de cada punto del radioenlace y las alturas de antenas, como se observa en la figura 3.

El ángulo de elevación en el punto B se observa en la ecuación 11.

$$\theta_B = \text{ArcTg} \left( \frac{h_{Tx} - h_{Rx}}{d} \right) \quad (11)$$

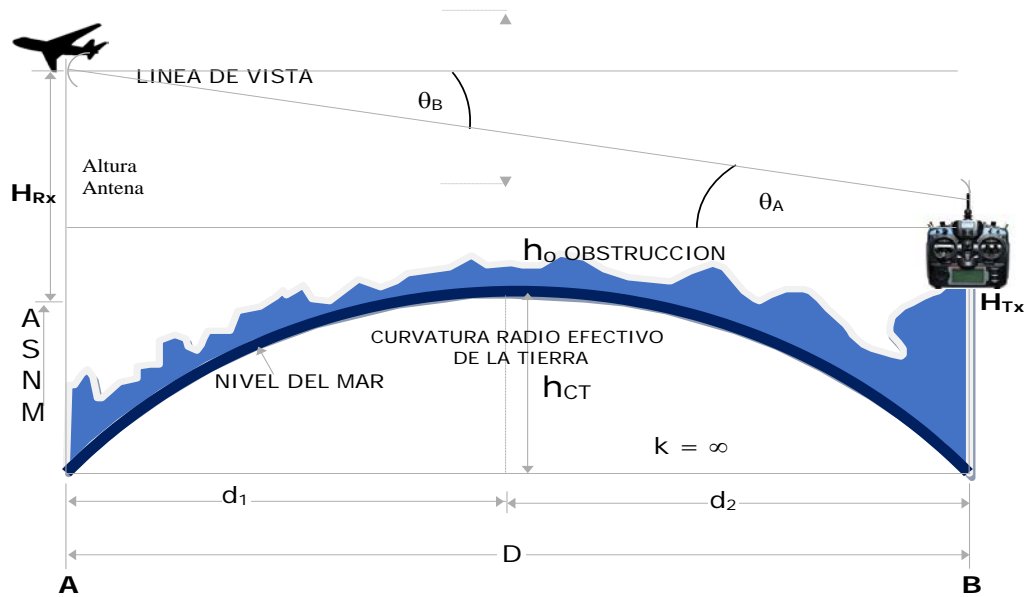


Figura 3 Ángulos de elevación del radioenlace.

De aquí se deduce el valor de los ángulos de:  $\theta_A = -1.42^\circ$ ,  $\theta_B = 1.42^\circ$ .

La propagación de las ondas de radio inicia su trayecto desde la estación base, y están sujetas a la degradación causada por los fenómenos físicos tales como: refracción, reflexión y absorción causadas por su interacción con el medio y otros objetos de dispersión presentes en la trayectoria de radio entre el transmisor y el receptor. La figura 4 muestra a todos los parámetros involucrados y que se estarán obteniendo con las siguientes ecuaciones.



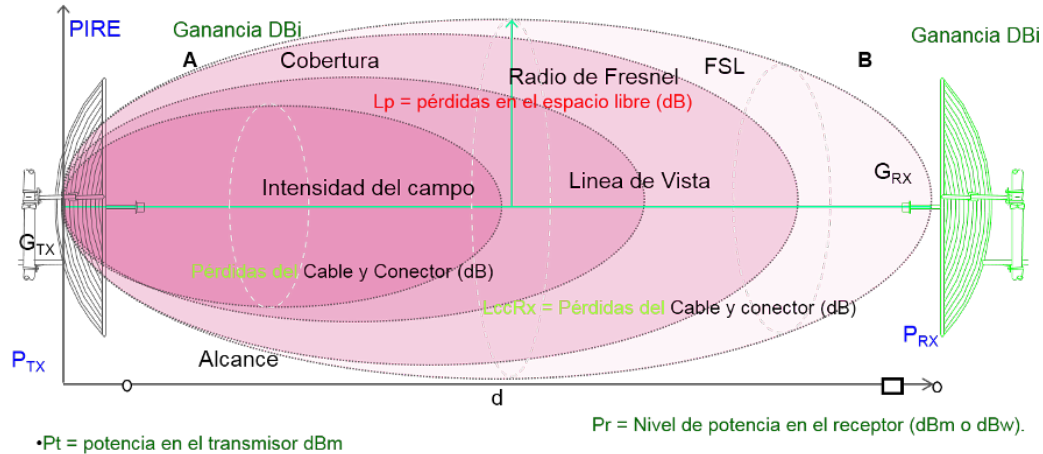


Figura 4 Parámetros del radioenlace.

Para obtener el valor del PIRE, se representa en la ecuación 12.

$$PIRE = PT - LLT - LC + GTx \quad (12)$$

Donde:

$PT$  = Potencia del transmisor,

$LLT$  = Pérdidas por línea de transmisión,

$LC$  = Pérdidas por conectores,

$GTx$  = Ganancia de antena transmisora.

Para alimentar la antena se requiere una potencia de transmisor de  $P_T=30$  dBm, la ganancia de la antena es de 3 dBi. La línea de transmisión cuya atenuación es de  $LLT(A)$  y  $LLT(B) = 0.1$  dB. Cada conector presenta una pérdida de 0.5 dB y dado que se utilizan dos conectores en cada estación, se tiene que hay una pérdida de 1dB por conectores en cada estación  $LCtx = LCrx = 1$  dB. El PIRE en la estación A se determina como  $PIRE(A) = 30$  dBm + 3 dB - 0.1dB - 0.5 dBi = 32.6 dBm

Las pérdidas en espacio libre se atenúan en mayor o menor grado dependiendo de la distancia recorrida y la frecuencia utilizada, la atenuación se observa en la ecuación 13 [Mammadov, 2013], [Peng, 2016] y [Elchin, 2013].

$$FSL = 92.44dB + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (13)$$

Del punto A al punto B se utiliza una frecuencia  $f = 900$  MHz, de modo que,  $FSL(AB) = 142.14$  dB. El margen de desvanecimiento, es el parámetro que indica

un nivel adicional de atenuación en la señal debido a los factores climáticos y geográficos del medio, su magnitud se determina por la ecuación 14 [Venkatasubramanian, 2013], [Kakar, 2015], [Cavalcanti, 2017].

$$FM = 30 \log(d) + 10 \log(6abf) - 10 \log(1 - R) - 70 \quad (14)$$

Donde:

$FM$  = Margen de desvanecimiento [dB],

$a$  = Factor topográfico (1=terreno plano,  $\frac{1}{2}$  = promedio,  $\frac{1}{4}$ =montañoso),

$b$  = Factor climático ( $\frac{1}{2}$ = húmedo,  $\frac{1}{4}$ = normal,  $\frac{1}{8}$ = seco),

$R$  = Confiabilidad del sistema [0,1].

En base a los valores  $a = 1$ ,  $b = 1/4$  y una confiabilidad  $R = 0.9999$ , se calcula el margen de desvanecimiento, de A a B la frecuencia a utilizar es  $f = 900 \text{ MHz}$  y  $FM(AB) = 11.15 \text{ dB}$ .

El nivel de recepción de la señal (RSL), es la cantidad de señal a la entrada del receptor el cual se deduce de la ecuación 15 [Lee, 1993], [Miller, 2015] y [Choudhary, 2015].

$$RSL = EIRP - FSL + G_{Rx} - L_{LTr} - L_{Cr} - FM \quad (15)$$

Donde:

$EIRP$  = Potencia Radiada Efectiva.

$FSL$  = Pérdidas en espacio libre.

$G_{Rx}$  = Ganancia de antena receptora.

$L_{Tx}$  = Pérdidas en la línea de transmisión en el receptor,

$L_{Cr}$  = Pérdidas por conectores en el receptor,

$FM$  = Margen de desvanecimiento.

$FM$  en la dirección de A hacia B, el nivel de señal recibida es:  $RSL(AB) = 32.6 - 42.14 + 2.1 - 0.5 - 0.1 - 11.15 = -119.19 \text{ dBm}$ . Los datos de la sensibilidad y ganancias de las antenas se obtienen de las hojas técnicas del radiomodem RFD900 de 900 MHz, con ultra largo alcance.

### 3. Resultados

En esta sección se muestran los resultados, en la tabla 1 se presentan los parámetros de la estimación con las especificaciones del sistema y del circuito, así como las pérdidas totales y en la figura 5 el rango de la cobertura del radioenlace.

#### 4. Discusión

Si bien hay suficiente potencia en la antena receptora del dron, es posible que se presenten condiciones climáticas severas que pudieran afectar la sustentación del dron. La suficiencia de potencia de recepción, junto con los márgenes de confianza del orden de 10 dB estimados, no hacen un enlace seguro, debido a la probabilidad de obstrucción de línea de vista y con esto, provocar un desvanecimiento súbito de la señal del radioenlace, por lo que para garantizar la radiocomunicación en este rango debe asegurarse que el radiocontrol siempre apunte hacia el dron y que no se presenten obstrucciones [Yajnanarayana, 2018].

Tabla 1 Caracterización del Radioenlace.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Permisionario	CITEDI-IPN	
Horario	De 12: a 15:00	Horas
Circuito	Centro de Convenciones Rosarito - Isla Coronado	B. C.
Longitud del enlace	16.84	Km
Potencia Nominal	30	dBm
Antena	Omnidireccional	360o
Polarización	Lineal	Normal
Ganancia	3	dBi
Altura SNM	30	m
Altura S.T:	1	m
Latitud A	32° 23' 17"	Norte
Longitud A	117° 03' 35"	Oeste
Latitud B	32° 23' 37"	Norte
Longitud B	117° 14' 20"	Oeste
MODULACION	Espectro disperso de salto de frecuencia	FHSS
Velocidad de transferencia de datos de aire	8, 16, 19, 24, 32, 48, 64, 96, 128, 192 y 250, 500 (seleccionable, predeterminado 64k)	kbit / sec
Tasa de error	10-6	Bit
Pot. de transmisión:	32.4	dBm
Perd. en espacio libre:	142.14	dB
Perd. en conectores:	0.50	dB
Perd. en l. Transmisión:	0.10	dB
Pérdidas totales:	170.22	dB
Nivel señal recibida	-119.19	dBm

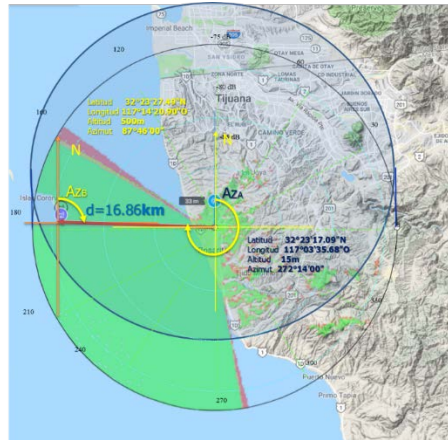


Figura 5 Cobertura del radioenlace a 16.86 km.

## 5. Conclusiones

El análisis del radioenlace entre el control remoto y la UAV se estimó una comunicación punto a punto, se observó que el nivel de la señal recibida fue superior en más de 10 dBm para el máximo rango de comunicación fijado.

El valor de la atenuación de la señal se mantuvo por debajo del nivel de la potencia recibida. El libramiento de 60% de la primera zona de Fresnel, permaneció libre de obstrucciones. El margen de desvanecimiento de la señal no fue afectado por la condición climática, la UAV permaneció en el horizonte y en línea de vista frente a la curvatura de la tierra.

No es suficiente con que la señal que llega al receptor sea mayor al nivel que fija el piso de la sensibilidad del receptor, sino que además se requiere de un margen que garantice el funcionamiento adecuado, cuando se presenten condiciones climáticas severas.

Lo único que podría afectar al radio enlace es que se presenten fallas de energía en la batería, esto debido a que alimenta tanto al sistema del radiocomunicador, como al sistema de control de vuelo del UAV.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Andersen, J.B., Rappaport, T.S. and Yoshida, S. (1995) Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels, IEEE Communications Magazine, January 1995, pp. 42-49.

- [2] ARRL UHF/Microwave Experimenter's Manual (American Radio Relay League, 1990).
- [3] Belal, R. (2016). Analysis, estimation and prediction of fading for a time-variant UAV-ground control station wireless channel for cognitive communications.
- [4] Bertoni, H. L., Honcharenko, W., Maciel, L.R. and Xia, H. H., UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communications, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 9, September 1994, pp. 1333-1359.
- [5] Campbell Scientific, Inc. (2016). The Link Budget and Fade Margin. App. Note Code: 3RF-F
- [6] Cavalcanti, B. J., Cavalcante, G. A., Mendonça, L. M. D., Cantanhede, G. M., de Oliveira, M. M., & D'Assunção, A. G. (2017). A Hybrid Path Loss Prediction Model based on Artificial Neural Networks using Empirical Models for LTE and LTE-A at 800 MHz and 2600 MHz. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(3), 708-722.
- [7] CCIR (now ITU-R) Report 567-4, Propagation data and prediction methods for the terrestrial land mobile service using the frequency range 30 MHz to 3 GHz (International Telecommunication Union, Geneva, 1990).
- [8] CCIR Report 1145, Propagation over irregular terrain with and without vegetation (International Telecommunication Union, Geneva, 1990).
- [9] Choudhary, S., & Dhaka, D. K. (2015). Path loss prediction models for wireless communication channels and its comparative analysis. *Int. J. Eng. Management & Sciences*, 2(3), 38-43.
- [10] Dalbakk, L. E. (2014). Antenna System for Tracking of Unmanned Aerial Vehicle (Master's thesis, Institutt for elektronikk og telekommunikasjon).
- [11] Doble, J. (1996). Introduction to Radio Propagation for Fixed and Mobile Communications. Artech House.
- [12] Elchin, M. (2013). Long-range Communication Framework for Autonomous UAVs (Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa).
- [13] Freeman, R.L. (1987). Radio System Design for Telecommunications. Wiley & Sons.

- [14] Hall, M.P.M., Barclay, L.W. and Hewitt, M.T. (1996). Propagation of Radiowaves. Institution of Electrical Engineers.
- [15] He, R., Zhong, Z., Ai, B., Ding, J., & Guan, K. (2012). Analysis of the relation between Fresnel zone and path loss exponent based on two-ray model. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 11, 208-211.
- [16] Kakar, J. A. (2015). UAV communications: Spectral requirements, MAV and SUAV channel modeling, OFDM waveform parameters, performance and spectrum management (Doctoral dissertation, Virginia Tech).
- [17] Lee, W.C.Y., *Mobile Communications Design Fundamentals*, Second Edition (Wiley & Sons, 1993).
- [18] Mammadov, E. (2013). Long-range Communication Framework for Autonomous UAVs. Doctoral dissertation, Université d'Ottawa/University of Ottawa.
- [19] Miller, P. G. (2015). Design of a Remote Person View System for a Long Range UAV. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Aerospace Engineering, Instituto Superior Técnico de Lisboa.
- [20] Peng, J. (2016). Performance of TCP congestion control in UAV networks of various radio propagation models. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)* Vol.8, No.2, March 2016.
- [21] Venkatasubramanian, S. N. (2013). Propagation channel model between unmanned aerial vehicles for emergency communications.
- [22] Yajnanarayana, V., Wang, Y. P. E., Gao, S., Muruganathan, S., & Lin, X. (2018). Interference mitigation methods for unmanned aerial vehicles served by cellular networks. arXiv preprint arXiv:1802.00223.

# **FILTRO DIGITAL DE LOS COEFICIENTES ACÚSTICOS EN MATERIALES SÓLIDOS EN UN TUBO DE IMPEDANCIA CON DOS CÁMARAS ACÚSTICAS**

*DIGITAL FILTER OF ACOUSTIC COEFFICIENTS IN SOLID  
MATERIALS IN AN IMPEDANCE TUBE WITH TWO ACOUSTIC  
CHAMBERS*

**Rosnely Cruz Cecilio**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ross.nely@gmail.com*

**Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ervc@azc.uam.mx*

**Laura Angélica Lancón Rivera**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*lalr@azc.uam.mx*

## **Resumen**

Este trabajo consideró como referencia la técnica del tubo de impedancia para determinar el coeficiente de absorción, en términos de los coeficientes de reflexión y transmisión, cuando una onda acústica de frecuencia variable y amplitud constante incide sobre un material de prueba. El prototipo utilizó un tubo de Policloruro de Vinilo confinando una o dos cámaras acústicas acopladas por una pieza de Nylamid, la cual a su vez se utilizó como portamuestras. Un amplificador Lock-In registró la Función de Transferencia, 600 a 8 kHz, la cual se relacionó con los coeficientes acústicos del material. El coeficiente de absorción obtenido para un material de referencia de Espuma de Poliuretano muestra una adecuada aproximación con los reportados para dos diferentes espesores. Un filtro de promedio móvil eliminó las oscilaciones por la superposición de ondas acústicas en un tubo corto. Cuatro materiales de prueba fueron caracterizados en base a su respuesta acústica.

**Palabras Claves:** Absorción, transmisión, tubo de impedancia, reflexión.

## Abstract

*This work makes reference to the impedance tube technique for determining the absorption coefficient, in terms of the reflection and transmission coefficients, when an acoustic wave of variable frequency and constant amplitude strikes on a test material. The prototype used a polyvinyl chloride tube containing one or two acoustic chambers coupled by a piece of Nylamid, which in turn was used as a sample holder. A Lock-In amplifier recorded the Transfer Function, 600 at 8 kHz, which was related to the acoustic coefficients of the material. The absorption coefficient obtained for a polyurethane foam reference material shows an adequate approximation with those reported for two different thicknesses. A moving average filter eliminated the oscillations by the superposition of acoustic waves in a short tube. Four test materials were characterized based on their acoustic response.*

**Keywords:** *Absorption, impedance tube, reflection, transmission.*

## 1. Introducción

La creación de diversos materiales ha enfocado distintos campos de aplicación en la ingeniería, proponiendo soluciones en términos de la respuesta a un estímulo térmico, eléctrico, mecánico, corrosivo, entre otros. Las diferentes técnicas empleadas para llevar a cabo la caracterización de un material deben cumplir con estándares que garantizan repetitividad y validan los resultados obtenidos a través de un protocolo establecido. Una de las características que ha tomado relativa importancia hoy en día se basa en cuantificar la respuesta de un material a un estímulo acústico. En otras palabras, determinar la respuesta acústica de un material, de manera no invasiva, cuantifica la magnitud de presión sonora reflejada ( $P_r$ ), transmitida ( $P_t$ ) y absorbida ( $\alpha$ ). La figura 1 muestra el efecto producido cuando una presión acústica incidente ( $P_i$ ) impacta un material de prueba.

El conocer la magnitud de presión de cada onda acústica cuantifica los coeficientes de reflexión ( $R$ ) y transmisión ( $T$ ), en términos de la onda incidente, como se describe en las ecuaciones 1 y 2, respectivamente.

$$R = \frac{P_r}{P_i} \quad (1)$$



$$T = \frac{P_t}{P_i} \quad (2)$$

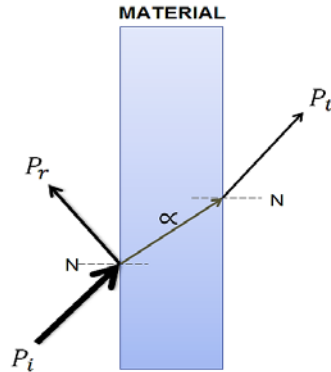


Figura 1 Representación esquemática de las presiones acústicas.

Los parámetros anteriores son utilizados para determinar el coeficiente de absorción ( $\alpha$ ), dado por la ecuación 3.

$$\alpha = 1 - |R|^2 - |T|^2 \quad (3)$$

La relevancia de este parámetro se usa en la acústica arquitectónica, la cual es una de las áreas que emplea diversos métodos y modelos para comprender el comportamiento del sonido y su interacción con el espacio arquitectónico y urbano. En este sentido, la contaminación acústica en espacios urbanos generada por fuentes de ruido (tránsito vehicular, industrias, negocios, escuelas, centros de diversión, etc.), se ha convertido en un problema de salud, principalmente en las grandes ciudades. Se han realizado diversos estudios en los cuales se ha determinado que, cuando estos niveles de ruido sobrepasan los 60 dB puede afectar el rendimiento del individuo y por consecuencia su calidad de vida [Oshima, 2014] y [Molerón, 2013]. De aquí que, las propiedades acústicas de un material son fundamentales para conocer las magnitudes de presión sonora que se reflejan, transmiten y absorben, cuando una onda acústica incidente impacta un material sólido.

El método experimental más conocido para obtener las propiedades acústicas de un material de prueba es el tubo de impedancia [Feng, 2013]. Este es utilizado

para caracterizar muestras pequeñas de materiales sólidos. El método consta de una bocina colocada en uno de los extremos del tubo, la cual genera una onda acústica que se propaga a través del tubo liso y rígido, que se usa como guía de onda, para impactar un material de prueba colocado en el otro extremo del tubo cerrado. Dos micrófonos sobre la pared interna del tubo, son utilizados para registrar las señales acústicas generadas, las cuales son procesadas para determinar los coeficientes acústicos [Lancón, 2012], [Navacerrada, 2008] y [Castañeda, 2004].

Diferentes versiones del tubo de impedancia se han desarrollado para determinar la respuesta acústica de un material de prueba. El método de la Función de Transferencia (FT) compara la respuesta registrada en dos puntos diferentes para determinar el coeficiente de reflexión y transmisión en función de la frecuencia.

## **2. Métodos**

El diseño de un tubo de impedancia se basa principalmente en los parámetros físicos del tubo y en el ancho de banda de la instrumentación utilizada. Las normas ASTM C384-04, ASTM E1050-12 e ISO 10534-2 establecen el rango de frecuencia ( $f_{max}()$ ), definido por la ecuación 4, que puede ser utilizado en las ondas acústicas, así como la distancia que existe entre ambos micrófonos ( $s$ ) y la distancia entre el material de prueba y el micrófono más cercano al material de prueba ( $l'$ ), establecidos por las ecuaciones 5 y 6, respectivamente.

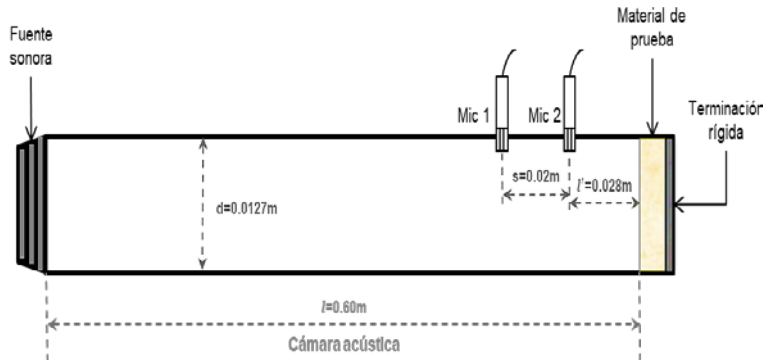
$$f_{max} = \frac{0.1 c}{2 \pi s} \quad (4)$$

$$s = \frac{0.8 c}{2 f_{max}} \quad (5)$$

$$l' = 2 d \quad (6)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido a temperatura ambiente, 345 m/s. Estos parámetros se utilizaron para construir un primer prototipo, el cual cuenta con una sola cámara acústica, como se muestra en la figura 2. Se caracteriza por una terminación cerrada en el respaldo del material de prueba.

A pesar de que el diseño del tubo considera el uso de frecuencias relativamente bajas, la respuesta de la bocina establece una frecuencia mínima de 600 Hz y los parámetros físicos del tubo una frecuencia máxima de 8 kHz.



a) Diseño.



b) construcción.

Figura 2 Tubo de impedancia con una cámara acústica.

El diagrama esquemático de la figura 3 muestra la conexión del sistema experimental. Un amplificador Lock-In es utilizado para generar una señal sinusoidal de frecuencia variable y de amplitud constante (Chirp). El barrido de frecuencia se lleva a cabo en 100 segundos. La señal eléctrica se hace pasar por un amplificador de audio para incrementar la potencia de la señal, antes de hacerla llegar a la bocina. La ganancia es cuidadosamente seleccionada para evitar distorsión y saturación en el registro de las señales acústicas. La señal acústica registrada por cada micrófono es amplificada, antes de hacerla llegar al amplificador Lock-In. Las respuestas en frecuencia  $p_1$  y  $p_2$  se obtienen mediante una comparación entre la señal de referencia generada por el amplificador Lock-In y la respectiva señal registrada por cada micrófono [Song, 2000].

En general, la Función de Transferencia (FT) acústica se define como la relación de las respuestas en frecuencia, representada por la ecuación 7.

$$H_{ij} = \frac{P_j}{P_i} \quad (7)$$

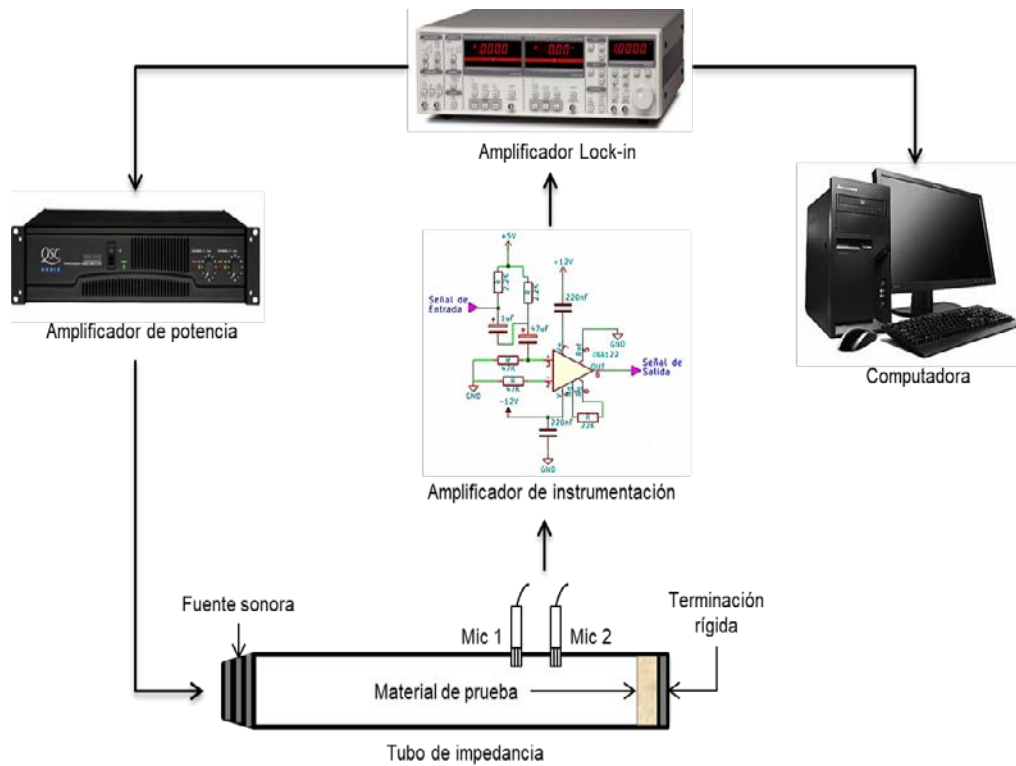


Figura 3 Montaje experimental del tubo de impedancia.

Donde los subíndices  $i$  y  $j$  corresponden a las respuestas en frecuencia de los micrófonos posicionados a lo largo de la cámara acústica. Por otro lado, es necesario tomar en cuenta que, debido a la corta longitud de la cámara acústica, las respuestas en frecuencia de cada micrófono registran tanto la onda incidente como la onda reflejada, en función de la distancia. De aquí que la FT se define como la ecuación 8.

$$H_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\dot{U}_i e^{-jkx_2} + \dot{U}_r e^{-jkx_2}}{\dot{U}_i e^{-jkx_1} + \dot{U}_r e^{-jkx_1}} \quad (8)$$

La metodología establece entonces una FT para la señal incidente ( $H_I$ ) y reflejada ( $H_R$ ), las cuales definen la relación entre las mismas presiones acústicas a diferentes posiciones dadas por las ecuaciones 9 y 10.

$$H_I = \frac{P_i(x_2)}{P_i(x_1)} = \frac{\dot{U} P_i e^{-jkx_2}}{\dot{U} P_i e^{-jkx_1}} \quad (9)$$

$$H_R = \frac{P_r(x_2)}{P_r(x_1)} = \frac{\dot{U} P_r e^{-jkx_2}}{\dot{U} P_r e^{-jkx_1}} \quad (10)$$

Las ecuaciones 8, 9 y 10, se utilizan para definir el coeficiente de reflexión en términos de la FT, el cual es equivalente a la razón de la presión reflejada respecto a la presión incidente, como se muestra en la ecuación 11.

$$|R| = \left| \frac{H_{12} - H_I}{H_R - H_{12}} (e^{2jkx_1}) \right| = \left| \frac{\dot{U} P_r}{\dot{U} P_i} \right| \quad (11)$$

El diseño de una sola cámara acústica considera nulo el coeficiente de transmisión, ya que el material se sitúa en el extremo cerrado del tubo [Salissou, 2009], [Salissou, 2010] y [Pérez, 2000]. De aquí que es posible conocer el coeficiente de absorción definido por la ecuación 12.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (12)$$

No obstante, para determinar los coeficientes de reflexión, absorción y transmisión de un material de prueba, es necesario construir un tubo de impedancia que contemple dos cámaras acústicas. El uso de un portamuestras facilitó el sostener el material de prueba y acoplar las dos cámaras acústicas. En este caso, el análisis para determinar la distancia que existe entre los micrófonos de la segunda cámara acústica y el material de prueba, es el mismo que se implementó para la primera cámara acústica. El diseño y construcción del segundo prototipo se muestra en la figura 4. Este diseño utiliza una terminación anecoica cerrada al final de la segunda cámara acústica, para evitar reflexiones de las ondas transmitidas.

El registro de las señales acústicas se realizó de la misma forma que el tubo de impedancia con una cámara acústica. En este caso, además de determinar la FT de la señal reflejada, también se determina la FT de la señal transmitida definida por la ecuación 13.

$$|T| = \left| \frac{H_{34} - H_1}{H_T - H_{34}} (e^{2jkx_4}) \right| = \left| \frac{\dot{U}_t}{\dot{U}_i} \right| \quad (13)$$

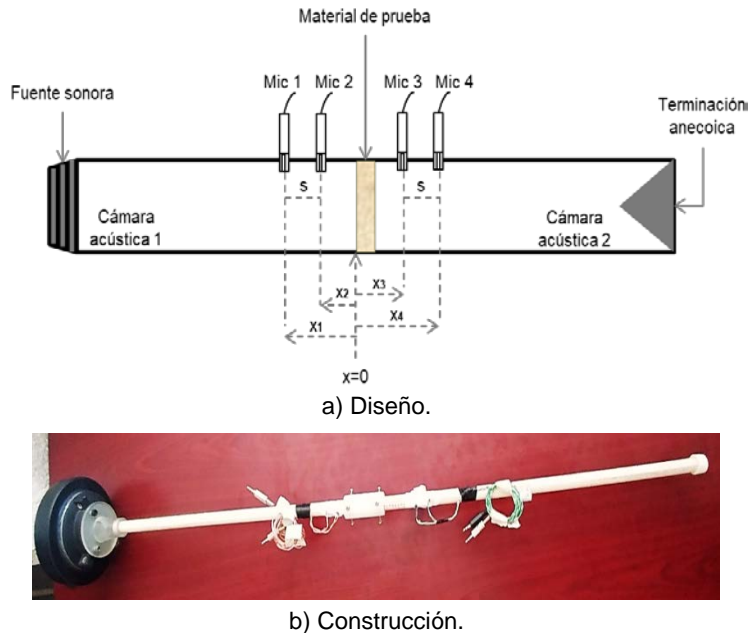


Figura 4 Tubo de impedancia con dos cámaras acústicas acopladas.

Una vez obtenidos el coeficiente de reflexión y transmisión se puede conocer el coeficiente de absorción utilizando la ecuación 3. Cabe mencionar que, el procesamiento de señales consideró un proceso de filtrado de promedio móvil, para eliminar el efecto oscilante en los coeficientes acústicos experimentales generados por la superposición de las ondas en el interior del tubo de impedancia. Es importante mencionar que las mediciones se llevaron a cabo en la cámara semianecoica del Área de Investigación de Análisis y Diseño Acústico de la UAM, Azcapotzalco, para evitar los ruidos ambientales y eléctricos.

### 3. Resultados

Después de poner en funcionamiento la instrumentación, considerando un tubo de impedancia con una sola cámara acústica, se procedió a definir los parámetros de operación de los amplificadores de potencia y Lock-In, los cuales se describen en la tabla 1.

Tabla 1 Definición de los parámetros de operación.

Instrumentos	Parámetros
Amplificador de potencia, NADY AUDIO XA-900	Ganancia: 3 dB
Amplificador Lock-In, SR-850	Sensitividad: 1 V Constante de tiempo: 300 ms Filtro Db: 24 Sample Rate: 8 Hz Scan Length: 100 s Sine Output: 132 ms Barrido interno: 10-8000 Hz Ref. Phase: 0.00 grados

La puesta en marcha del tubo de impedancia con dos cámaras acústicas y cuatro micrófonos se basó en el mismo montaje experimental descrito en la figura 3. Se realizó un barrido de los 50 Hz a los 10 kHz para evitar transitorios en los límites del rango de operación del tubo de impedancia. Las respuestas en frecuencia fueron seleccionadas en el rango de operación establecido para el respectivo análisis.

La Espuma de Poliuretano se tomó como material de referencia, a partir de que se conocen algunos valores de sus coeficientes de absorción [Flores, 2013]. Se realizaron dos pruebas con dicho material, la primera fue con una muestra que presenta un espesor de 0.015 m y la segunda con 0.035 m de espesor, figura 5.



Figura 5 Espuma de poliuretano de 0.015 m y 0.035 m de espesor.

La figura 6 muestra las magnitudes de los coeficientes de reflexión y transmisión, obtenidos de las ecuaciones 11 y 13, respectivamente, mediante líneas continuas. Las curvas punteadas representan las señales procesadas mediante un filtro de promedio móvil. Como se observa en ambas figuras, la magnitud del coeficiente de reflexión es relativamente mayor que el coeficiente de transmisión, excepto para la frecuencia de 3 kHz, en donde presentan magnitudes similares.

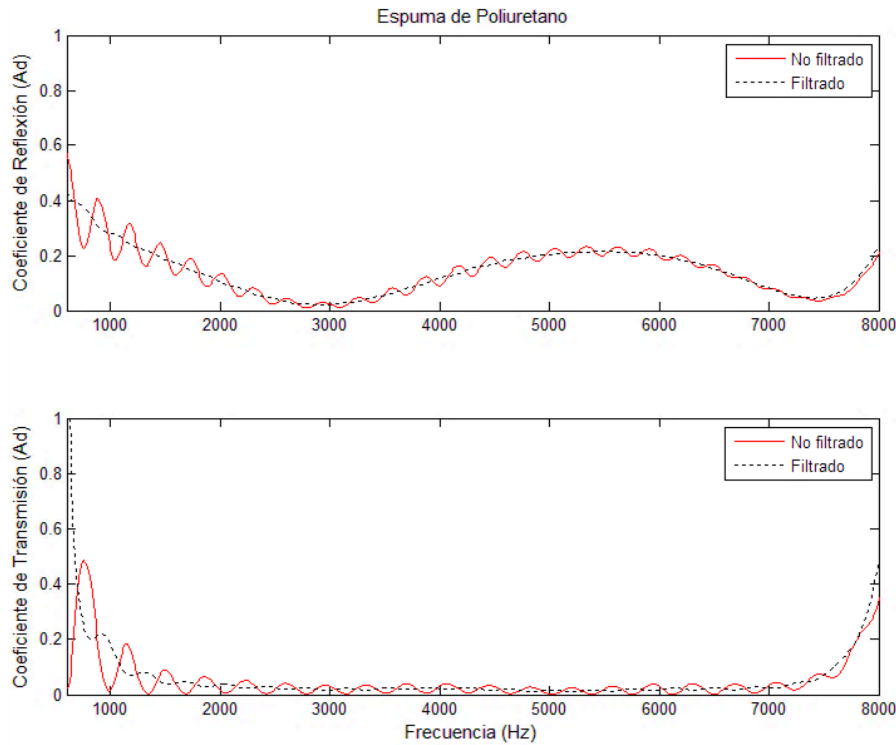


Figura 6 Coeficiente de reflexión y transmisión de espuma de poliuretano (0.015 m).

La respuesta de ambos coeficientes acústicos, en función de la frecuencia, es utilizada para determinar el coeficiente de absorción, utilizando la ecuación 3. La figura 7 muestra una curva continua que representa la magnitud del coeficiente de absorción no filtrado de la Espuma de Poliuretano. La curva punteada representa el coeficiente de absorción filtrado. Los valores de referencia a frecuencias específicas fueron superpuestos en esta misma figura, utilizando un asterisco (\*) como marcador [Flores, 2013]. Una comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo y los tres valores obtenidos en la literatura muestran una aproximación adecuada.

Se realizó una segunda prueba con el mismo material, pero con diferente espesor, 0.035 m. Al igual que la primera prueba se obtuvo la magnitud de los coeficientes de reflexión y transmisión, no filtrados, los cuales se muestran como una línea continua en la figura 8. En este caso, la curva filtrada del coeficiente de reflexión presenta un comportamiento más uniforme y menos oscilante en comparación al espesor de 0.015 m (figura 6).



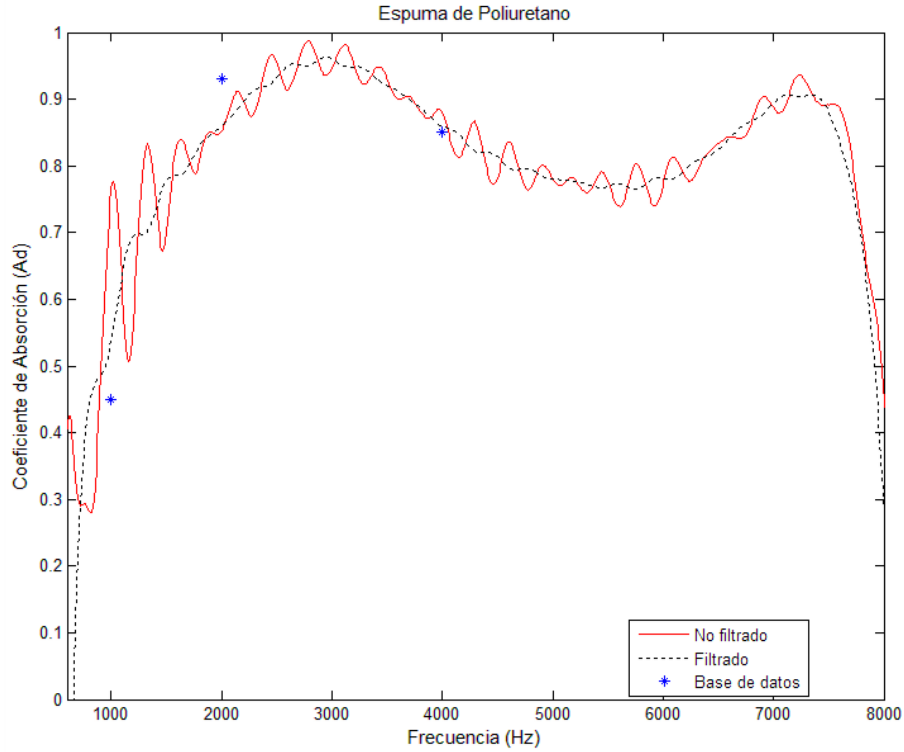


Figura 7 Coeficiente de absorción y transmisión, obtenida por la FT, y los tres valores obtenidos de una base de datos para 1, 2 y 4 kHz [Flores, 2013].

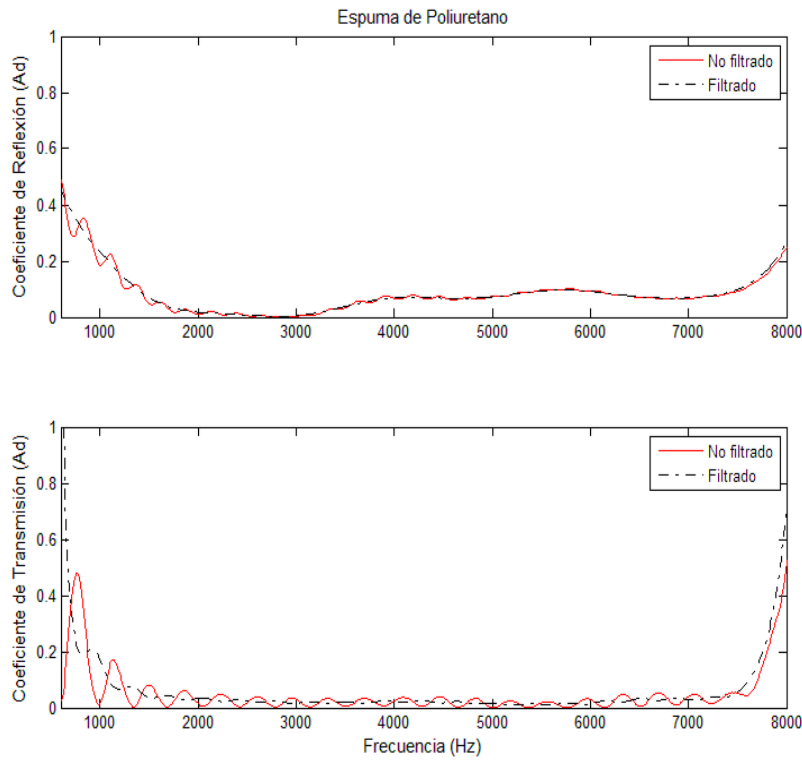


Figura 8 Coeficiente de reflexión y transmisión de la espuma de poliuretano (0.035 m).

La figura 9 muestra las curvas del coeficiente de absorción, filtrada y no filtrada, las cuales fueron obtenidas a partir de sus respectivos coeficientes de reflexión y transmisión del material de prueba. Como en el caso anterior se sobreponen los valores de referencia reportados en la literatura, los cuales se identifican con un asterisco (\*) [Flores, 2013].



Figura 9 Coeficiente de absorción y transmisión, obtenida por la FT, y los tres valores obtenidos de una base de datos para 1, 2, 3, 4 y 5 kHz [Flores, 2013].

Puesto que, el contraste de la curva filtrada y los valores ya reportados son muy similares, se procedió a realizar la caracterización acústica para otros materiales de prueba: Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa, con espesores de 0.003 m, 0.003 m y 0.004 m, respectivamente, figura 10.

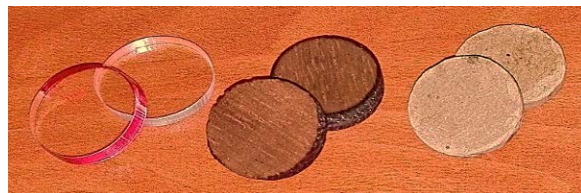


Figura 10 Fotografía del acrílico, de la madera balsa y el cartón comprimido.

En la figura 11 se contrastaron las curvas de los coeficientes acústicos filtrados de estos materiales. Las curvas del coeficiente de reflexión mantienen un comportamiento relativamente constante, es decir, sus magnitudes presentan una magnitud absoluta alrededor del valor de 0.6. El comportamiento de los coeficientes de transmisión para los tres materiales es muy similar y presentan una magnitud pequeña. Mientras que, las curvas del coeficiente de reflexión presentan magnitudes inferiores a 0.4.

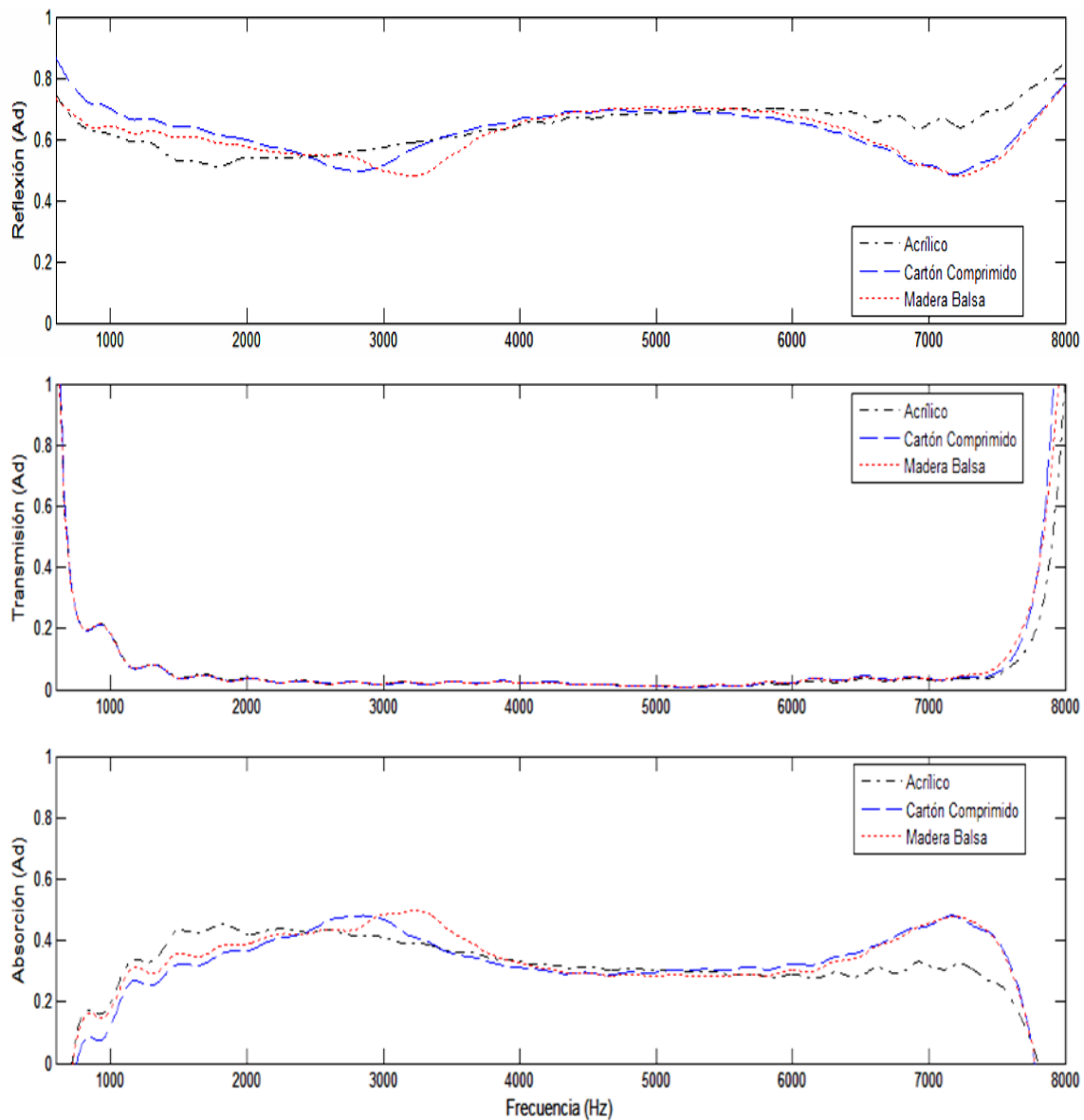


Figura 11 Coeficiente acústicos del acrílico, cartón comprimido y madera balsa.

## **4. Discusión**

El diseño y construcción de un primer prototipo del tubo de impedancia con una cámara acústica establecieron los parámetros y modo de operación de la instrumentación implementada, así como un adecuado manejo en la metodología experimental para tomar en cuenta ciertos factores en la instrumentación y equipo. La ganancia en los amplificadores de instrumentación y de potencia es un factor fundamental en la caracterización acústica para evitar saturación de las ondas acústicas a bajas frecuencias y mantener una alta relación señal a ruido en las altas frecuencias. Las condiciones de operación de una cámara semianecoica mantienen un relativo control para reducir los factores de ruido ambiental y eléctrico durante la caracterización acústica de un material de prueba. El adecuado acoplamiento entre las cámaras acústicas evita cambios de impedancia acústica ocasionados por fugas de sonido. Los resultados obtenidos para un material sólido de referencia, mediante la filtración previa, muestran una adecuada aproximación a los reportados en la literatura. De aquí que la metodología aplicada a un segundo prototipo, constituido por dos cámaras acústicas y acopladas por un portamuestras, cuantificaron el coeficiente de absorción, en términos del coeficiente de reflexión y transmisión. A pesar de que el análisis cualitativo contempla un tubo corto en el cual se tiene una separación pequeña entre micrófonos, el material de prueba y la fuente sonora, los resultados experimentales obtenidos muestran una oscilación de los coeficientes acústicos, la cual es reducida al implementar un filtro de promedio móvil. La clasificación de los materiales de prueba se basa entonces en uno de los coeficientes acústicos para referirlo como reflejante o absorbente, ya que el coeficiente de transmisión resulta ser relativamente bajo. Con estos coeficientes experimentales se puede decir que, la Espuma de Poliuretano es un material absorbente, mientras que el Acrílico, Cartón Comprimido y Madera Balsa se consideran como materiales reflejantes.

## **5. Conclusiones**

La flexibilidad del prototipo construido utiliza una o dos cámaras acústicas para colocar materiales sólidos de prueba con un espesor de hasta 0.035 m y obtener

sus coeficientes acústicos en un rango de 600 Hz a 8 kHz, a través de la Función de Transferencia. Para ello es necesario contar con las condiciones de aislamiento adecuadas, evitando contenidos de frecuencia no deseados por las condiciones externas ambientales, así como un manejo adecuado en los parámetros de la señal para evitar saturación. En este caso debido a la corta longitud del tubo de impedancia, fue necesario implementar un filtro de promedio móvil para representar el comportamiento promedio de los coeficientes acústicos en función de la frecuencia.

La descripción de los coeficientes acústicos permite estimar su aplicación para absorber o reflejar estímulos acústicos con una frecuencia específica. Con ello se podrá llevar a cabo la caracterización acústica de diferentes arreglos de materiales.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] ASTM C384-04(2016) Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials by Impedance Tube Method.
- [2] ASTM E1050-12 Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System.
- [3] Castañeda, J.A. y González, H.A. (2004). Medición del coeficiente de absorción del sonido. *Scientia et Technica* Año X, No.25, ISSN:0122-1701.
- [4] Feng, L. (2013). Modified impedance tube measurements and energy dissipation inside absorptive materials. *Journal Applied Acoustics*, 74, 1480-1485.
- [5] Flores, M.D., Ferreyra, S.P., Cravero, G.A., Budde, L., Longoni, H.C., Ramos, O.A. y Tommasini, F.C. (2013). Base de datos de coeficientes de absorción sonora de diferentes materiales. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Vol. XXXII, 2901-2908.
- [6] ISO 10534-2 Acoustics, determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, part 2: Transfer-function method.
- [7] Molerón, M., Félix, S., Pagneux, V, and Richoux, O. (2013). Low frequency acoustic resonances in urban courtyards. *CrossMark*, 4836295.

- [8] Lancón, L. (2012). Caracterizaion de la absorcion sonora en modelos físicos a escala (Maestría en diseño). Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, México, D.F.
- [9] Navacerrada, M.A., Díaz, C., Pedrero, A. y García, L.E. (2008). Acustic propieties of aluminium foams. *Materiales de construccion*, Vol. 58, ISSN: 0465-2746.
- [10] Oshima, T., Ishizuka, T. and Kamijo, T. (2014). Three-dimensional urban acoustic simulations and scale-model measurements over real-life. *JASA Express Letters*, 4879672.
- [11] Pérez, R.S. (2000). Extendiendo las capacidades de medición del tubo de impedancia del centro de instrumentos, UNAM. *Revista Mexicana de Física*, 46(5), 478-484.
- [12] Salissou, Y. and Panneton, R. (2009). A general wave decomposition formula for the measurement of normal incidence sound transmission loss in impedance tube. *Journal of the Acoustic Society of America*, 125 (4), 2083-2090.
- [13] Salissou, Y. and Panneton, R. (2010). Wideband characterization of the complex wave number and characteristic impedance of sound absorbers. *J. Acoust. Soc. Am.* 128 (5), 2868-2876.
- [14] Song, B.H. and Bolton, J.S. (2000). A Tansfer-matrix Approach for Estimating the Characteristic Impedance and Wave Numbers of Limp and Rigid Porous Materials. *Journal Acoustic Soc. Am.*, 107(3), 1131-1151.

# **ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT PARALELO TIPO DELTA DE TRES GRADOS DE LIBERTAD**

## *ANALYSIS AND CONSTRUCTION OF A THREE DEGREE OF FREEDOM PARALLEL DELTA ROBOT*

**Braulio José Cruz Jiménez**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*braulio.cruz@correo.uady.mx*

**Ricardo Javier Peón Escalante**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*rpeon@correo.uady.mx*

**José Iván Prado Costoyas**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*ivan91293@gmail.com*

**Luis Josué Ricalde Castellanos**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*lricalde@correo.uady.mx*

### **Resumen**

Este artículo presenta el análisis de la cinemática que describe al robot paralelo tipo Delta y la construcción de este. El robot Delta es uno de los primeros robots tipo paralelo que permite desplazar su efector final a altas velocidades con una buena precisión. Se plantean las ecuaciones de restricción que definen al robot Delta y a partir de ello se resuelve el problema de la cinemática inversa y directa. Se presenta el diseño para construir el robot Delta, el cual es simulado en Solidworks y el modelo cinemático es validado mediante una aplicación para dispositivos móviles. Los resultados experimentales muestran una excelente aproximación del modelo matemático con el desempeño del prototipo.

**Palabras Clave:** Análisis cinemático, aplicación móvil, construcción de robot, ecuaciones de restricción, robot Delta.

### **Abstract**

*This paper presents the kinematics analysis that describes a Delta robot with parallel kinematics and the construction of itself. The Delta robot is one of the first*

robots with parallel kinematics that allows to displace its final effect to a high speed and good precision. The restriction equations that define the delta robot are stated and the inverse and direct kinematics problem is solved. Design for construction of the Delta robot is presented and simulated in Solidworks and the kinematic model is validated through an application for mobile devices. making use of the inverse kinematics. Experimental results demonstrate an excellent approximation of the mathematical model in comparison with the prototype performance.

**Keywords:** Delta robot, kinematics analysis, mobile application, restriction equations, robot construction.

## 1. Introducción

Un robot es una máquina controlada por computadora y programada para moverse, manipular objetos y realizar trabajos, a la vez que interacciona con su entorno. El robot es capaz de efectuar diversas tareas complejas y realizar varias de éstas simultáneamente [Craig, 2006].

No existe una forma establecida de clasificar los robots, sin embargo, hay muchas formas de hacerlo. Una de estas formas es teniendo en cuenta su estructura: robots tipo serie y robots o manipuladores paralelos. Los robots tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, con una estructura similar al brazo humano, figura 1a. En cambio, los robots paralelos están formados por dos plataformas, una fija y otra móvil, unidas por varias cadenas cinemáticas, y por ello, formando cadenas cinemáticas cerradas, figura 1b [Stewart, 1965].



Figura 1 Robot tipos.



Los robots paralelos, también conocidos como máquinas cinemáticas paralelas (PKM), son mecanismos de lazo cerrado y son utilizados principalmente en aquellas aplicaciones donde sus características los hacen ideales para resolver aquellos problemas que se presentan en los robots tipo serie [Merlet 2006].

En el campo industrial existen dos estructuras paralelas que son los robots Hexápodos de seis grados de libertad, que proporcionan tres translaciones y tres rotaciones y el robot Delta propuesto por [Clavel, 1991] como se observa en la figura 2, que proporciona tres traslaciones y una difusión industrial importante.

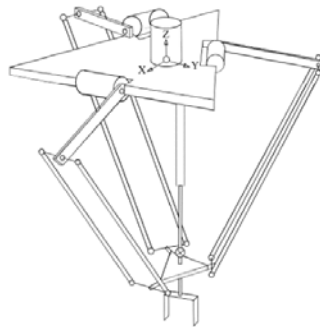


Figura 2 Esquema del robot Delta con cuatro grados de libertad [Clavel, 1991].

En un contexto más general, como se describe en el artículo de [Reynoso, 2005], el robot Delta consta de una plataforma fija, una plataforma móvil y de tres cadenas cinemáticas que unen a los anteriores. Cada cadena cinemática está compuesta por un brazo y un antebrazo. El primero de ellos está conectado a la base fija y es quien trasmite el movimiento de los actuadores; el segundo va conectado a la plataforma móvil. Ésta última consta de dos eslabones que en todo momento forman un paralelogramo, evitando así que el actuador final cambie su orientación; por otro lado, al presentar la forma característica de un paralelogramo en sus últimos eslabones, esto lo hace ser el primer robot en presentar una junta de tipo en donde se describe en el artículo de [Cervantes., 2011].

La idea original detrás de este diseño de robot paralelo es el uso de paralelogramos que forman juntas de tipo [Cervantes, 2011], por lo cual al utilizar tres paralelogramos se restringe totalmente la orientación de la plataforma móvil, que permanece con sólo tres grados de libertad trasnacionales. Los acoplamientos de

entrada de los tres paralelogramos están montados en ejes rotativos y estos ejes pueden ser actuados por diferentes tipos de motores como: motores a pasos, motores de corriente continua o alterna, y por actuadores lineales.

Debido a las características que describen al robot Delta y a la poca masa de sus brazos puede realizar hasta cinco maniobras por segundo. Este se utiliza en la manipulación de objetos o en operaciones conocidas como "Pick-and-Place", por lo cual es apto para el ámbito alimenticio ya que ofrece sencillez y rapidez a la hora de desplazar objetos y permite limpiarlo con facilidad; también se emplea en aplicaciones de empaquetado y de manufactura, como en impresoras 3D.

En la actualidad la patente del robot Delta la tienen varias empresas, que han ido fabricando diferentes adaptaciones de este, según la aplicación que se le vaya a dar. La compañía Elekta IGS, se especializa en intervenciones quirúrgicas y utilizó el diseño para posicionar un microscopio de 20 kg. La licencia del robot Delta fue posteriormente vendida a grupo ABB. Otras compañías que disponen de la licencia son Demarex y Hitachi Seiki, ambas encargadas de fabricar robots de pequeñas dimensiones [Rueda, 2008].

## 2. Métodos

### Ecuaciones de restricción

Las ecuaciones de restricción se obtienen a partir de establecer el marco de referencia que se encuentra en la base superior del robot como se muestra en la figura 3, denominado por el sistema de ejes coordenados  $\{B\}$ , cuyo origen se encuentra en el centro de la base del triángulo.

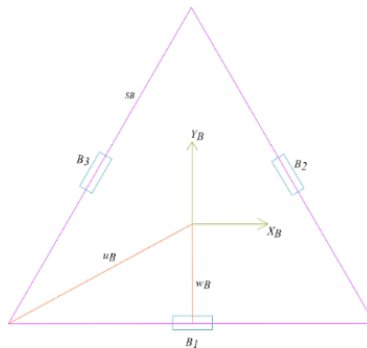


Figura 3 Esquema de nomenclaturas para la base fija del robot Delta.

La orientación de la trama o el sistema  $\{P\}$  es siempre idéntico a la orientación de  $\{B\}$  [Pedraza et al. 2015]. Entonces, la matriz de rotación  $\{{}_P^B R\}$  es igual a la matriz identidad  $\{I_3\}$  constante. Las variables de las juntas activas son  $\theta = \{\theta_1 \theta_2 \theta_3\}^T$ , y las variables cartesianas son igual a  ${}^B P_P = \{x y z\}^T$ . El diseño del robot Delta presenta tres cadenas cinemáticas idénticas, compuestas por tres brazos extremos superiores  $L$  y por tres extremidades inferiores  $l$  (el paralelogramo formado por un mecanismo de 4 barras) como se muestra en la figura 4.

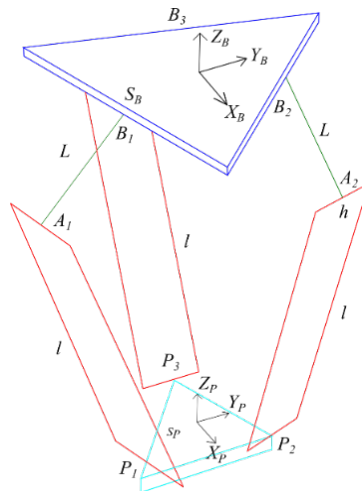


Figura 4 Diagrama con nomenclatura para el robot Delta en base a [Williams, 2016].

Los puntos de las juntas de revoluta en  $B_i$  en la base fija como se muestra en figura 3 son constantes en el marco de referencia  $\{B\}$  y los puntos de unión de las juntas esféricas  $P_i$  como se muestra en figura 5 son constantes en la marco o trama  $\{P\}$ .

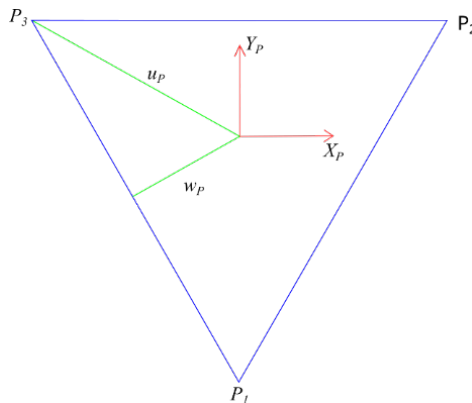


Figura 5 Esquema de nomenclaturas para la base móvil del robot Delta.

De la cinemática y con las condiciones geométricas antes presentadas se obtiene el cierre de circuito vectorial (ecuación 1).

$$\{^B B_i\} + \{^B L_i\} + \{^B l_i\} = \{^B P_P\} + [^B_P R]\{^P P_i\} = \{^B P_P\} + \{^P P_i\} \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

Donde el vector  $\{^B B_i\}$  es el vector desde el origen del marco  $\{B\}$  hasta las uniones con las articulaciones activas en donde se encuentran los motores;  $\{^B L_i\}$  es el vector de posición respecto al marco  $\{B\}$  para cada motor hasta la unión de las juntas pasivas con los eslabones inferiores del robot;  $\{^B l_i\}$  es el vector que va desde la junta esférica que une los eslabones de los brazos inferiores y superiores del robot  $L$  y  $l$  hasta la junta esférica inferior que une el triángulo equilátero móvil con el brazo inferior. Las representaciones de la derecha surgen del desplazamiento y rotación en los ejes de la trama o marco  $\{P\}$ , en donde se encuentra el efector último, con respecto a  $\{B\}$ .

En el robot Delta no existe rotación a lo largo de los ejes  $XY$ , por lo tanto, se cumple  $[^B_P R] = [I_3]$ . Las tres restricciones aplicables establecen que la longitud de las extremidades inferiores debe tener las mismas medidas constantes  $l$  (el eslabón virtual a través del centro de cada paralelogramo).

Se tiene que a partir de los vectores resultantes anteriores para  $\{^B l_i\}$  aplicando la ecuación 1 se tiene que las ecuaciones de restricción del robot Delta quedan planteadas en ecuaciones 2 a la 4.

$$2L(y + a) \cos \theta_1 + 2zL \sin \theta_1 + x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 = 0 \quad (2)$$

$$-L(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \cos \theta_2 + 2zL \sin \theta_2 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + 2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (3)$$

$$L(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \cos \theta_3 + 2zL \sin \theta_3 + 2zL \sin \theta_3 + x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 - 2xb + 2yc - l^2 = 0 \quad (4)$$

## Cinemática Inversa

El problema de la cinemática inversa para el robot Delta de tres grados de libertad establece que a partir de la posición cartesiana de la plataforma móvil a controlar

${}^B P_P = \{x \ y \ z\}^T$  se calculan los ángulos requeridos para las articulaciones activas  $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ .

La solución de la cinemática inversa para el robot delta no es tan complicada como en un robot serial. La cinemática inversa se resuelve analíticamente, usando las tres ecuaciones de restricción aplicadas para las ecuaciones de cierre vectorial.

El sistema de ecuaciones a resolver se muestra en la ecuación 5.

$$E_i \cos \theta_i + F_i \sin \theta_i + G_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

Donde:

$$\begin{aligned} E_1 &= 2L(y + a) \\ F_1 &= 2zL \\ G_1 &= x^2 + y^2 + z^2 + a^2 + L^2 + 2ya - l^2 \\ E_2 &= L(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \\ F_2 &= 2zL \\ G_2 &= x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(xb + yc) - l^2 \\ E_3 &= -L(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \\ F_3 &= 2zL \\ G_3 &= x^2 + y^2 + z^2 + b^2 + c^2 + L^2 + 2(-xb + yc) - l^2 \end{aligned}$$

Este sistema de ecuaciones, que aparece tanto en la cinemática de mecanismos y robots, comúnmente es resuelto usando la sustitución de la tangente del ángulo medio.

Si definimos:

$$t_i = \tan \frac{\theta_i}{2}, \quad \cos \theta_i = \frac{1 - t_i^2}{1 + t_i^2} \quad y \quad \sin \theta_i = \frac{2t_i}{1 + t_i^2}$$

Sustituyendo el cambio de variable de la tangente del ángulo medio dentro del sistema de ecuaciones 5 y despejando  $t_i$ , obtenemos la ecuación 6.

$$t_{1,2} = \frac{-F_i \pm \sqrt{E_i^2 + F_i^2 - G_i^2}}{G_i - E_i} \quad (6)$$

Resolviendo para  $\theta_i$  la ecuación 6, invirtiendo la definición original de la tangente de ángulo medio, se obtiene la ecuación 7.

$$\theta_i = 2 \tan^{-1}(t_i) \quad (7)$$

Las dos soluciones son correctas: con el extremo levantado y hacia abajo. Generalmente se elige, tal como en este caso, que representa a los eslabones activos articulados girando hacia el exterior en vez girar al interior.

Para la obtención de la velocidad es necesario derivar con respecto al tiempo las ecuaciones de restricción 2, 3 y 4. Se obtiene como resultado las ecuaciones 8, 9 y 10.

$$\dot{\theta}_1 = \frac{x\dot{x} + (y + a + L \cos \theta_1)\dot{y} + (z + L \sin \theta_1)\dot{z}}{L[(y + a) \sin \theta_1 - z \cos \theta_1]} \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_2 = -\frac{(2(x + b) - \sqrt{3}L \cos \theta_2)\dot{x} + (2(y + c) - L \cos \theta_2)\dot{y} + 2(z + L \sin \theta_2)\dot{z}}{L[(\sqrt{3}(x + b) + y + c) \sin \theta_2 + 2z \cos \theta_2]} \quad (9)$$

$$\dot{\theta}_3 = \frac{(2(x - b) + \sqrt{3}L \cos \theta_{32})\dot{x} + (2(y + c) - L \cos \theta_3)\dot{y} + 2(z + L \sin \theta_3)\dot{z}}{L[(\sqrt{3}(x - b) - y - c) \sin \theta_{32} - 2z \cos \theta_3]} \quad (10)$$

### Cinemática Directa

La cinemática directa consiste en encontrar la posición del efector final  ${}^B P_P = \{x \ y \ z\}^T$  en función de las variables controladas por los actuadores:  $\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ . Para poder resolver la cinemática directa se supone que la traslación de las esferas virtuales que se pueden formar en las articulaciones  $A_1, A_2$  y  $A_3$  tienen un radio  $l$  y al moverlas mediante el vector  ${}^B P_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  obtienen un nuevo centro en los puntos  $A_{iv}$ ,  $i = 1, 2, 3$  [Chkhartishvili, 2015]. La traslación de los puntos se muestra en la figura 6.

El objetivo de la traslación es que ahora las esferas se intersecten en el punto de interés  ${}^B P_P$ . Esto se puede hacer debido a que la base fija tiene la misma orientación que la base móvil, es decir,  ${}^B R = [I_3]$ . Posteriormente se resolverá el sistema de ecuaciones.

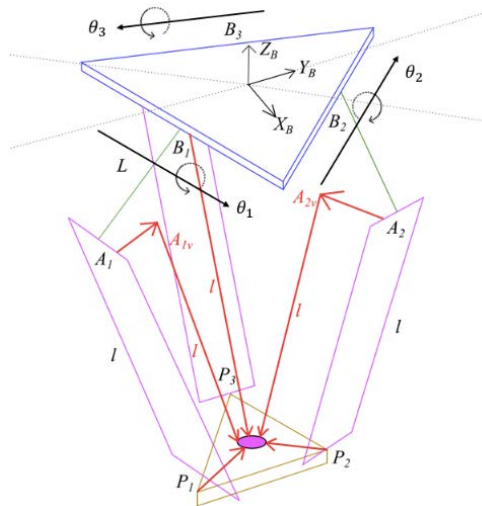


Figura 6 Traslación de los puntos  $A_1$ ,  $A_2$  y  $A_3$  mediante los vectores  ${}^B P_i$ .

Se utilizan tres esferas debido a que se desea encontrar un punto en el espacio, es decir, se requieren tres coordenadas y tres ecuaciones. La esfera se plantea como se muestra en la ecuación 11.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = r^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

Cumpléndose ecuaciones 12 a la 14.

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2yy_1 - 2zz_1 - 2xx_1 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 = l^2 \quad (12)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2yy_2 - 2zz_2 - 2xx_2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 = l^2 \quad (13)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2yy_3 - 2zz_3 - 2xx_3 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 = l^2 \quad (14)$$

Para solucionar este problema es necesario desarrollar los polinomios y combinar las ecuaciones de forma que se obtenga  $x = f(y)$  y  $z = g(y)$ , estos valores se sustituirán en la ecuación 12 y se encontrará la cuadrática en  $y$ . Las soluciones nos servirán para encontrar los valores de  $x$  y  $z$ .

A partir de las ecuaciones 12 a la 14 se llega a ecuaciones 15 y 16.

$$a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z = b_1 \quad (15)$$

$$a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z = b_2 \quad (16)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 2(x_3 - x_1) & a_{12} &= 2(y_3 - y_1) & a_{13} &= 2(z_3 - z_1) \\ a_{21} &= 2(x_3 - x_2) & a_{22} &= 2(y_3 - y_2) & a_{23} &= 2(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$b_1 = -2l^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2$$

$$b_2 = -2l^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2$$

Resolviendo para  $z$ , se obtienen ecuaciones 17 y 18.

$$z = \frac{b_1}{a_{13}} - \frac{a_{11}}{a_{13}}x - \frac{a_{12}}{a_{13}}y \quad (17)$$

$$z = \frac{b_2}{a_{23}} - \frac{a_{21}}{a_{23}}x - \frac{a_{22}}{a_{23}}y \quad (18)$$

Eliminando  $z$  para obtener  $x = f(y)$  se tiene ecuación 19.

$$x = a_4y + a_5 \quad (19)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{a_{11}}{a_{13}} - \frac{a_{21}}{a_{23}} & a_2 &= \frac{a_{12}}{a_{13}} - \frac{a_{22}}{a_{23}} \\ a_3 &= \frac{b_2}{a_{23}} - \frac{b_1}{a_{13}} & a_4 &= -\frac{a_2}{a_1} & a_5 &= -\frac{a_3}{a_1} \end{aligned}$$

Reemplazando ecuación 19 en ecuación 18 se obtiene  $z = g(y)$ , ecuación 20.

$$ay^2 + by + c = 0 \quad (20)$$

Donde:

$$\begin{aligned} a &= a_4^2 + 1 + a_6^2 \\ b &= 2a_4(a_5 - x_1) - 2y_1 + 2a_6(a_7 - z_1) \\ c &= a_5(a_5 - 2x_1) + a_7(a_7 - 2z_1) + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - l^2 \end{aligned}$$

Para poder resolver ecuación 20, se utiliza ecuación 21.

$$y = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (21)$$



Ahora sustituyendo las soluciones en ecuaciones 17 y 19, se determinan los valores de  $x$  y  $z$ , ecuaciones 22 y 23.

$$x_{\pm} = a_4 y_{\pm} + a_5 \quad (22)$$

$$z_{\pm} = a_6 y_{\pm} + a_7 \quad (23)$$

En general, existen dos soluciones, la primera, corresponde a la parte positiva y la segunda a la negativa. Esto porque las esferas se intersectan tanto en la parte superior como en la inferior. Es de importancia la parte inferior, es decir, la parte negativa. Por lo que las coordenadas serían:

$$(x_+ \ y_+ \ z_+)^T \quad (x_- \ y_- \ z_-)^T$$

### 3. Resultados

En esta sección se valida el modelado cinemático mediante la comparación de una simulación completa con las medidas que iban tener finalmente la construcción con el modelo realizado en Solidworks. En la figura 7 podemos observar el modelado en Solidworks del robot Delta.

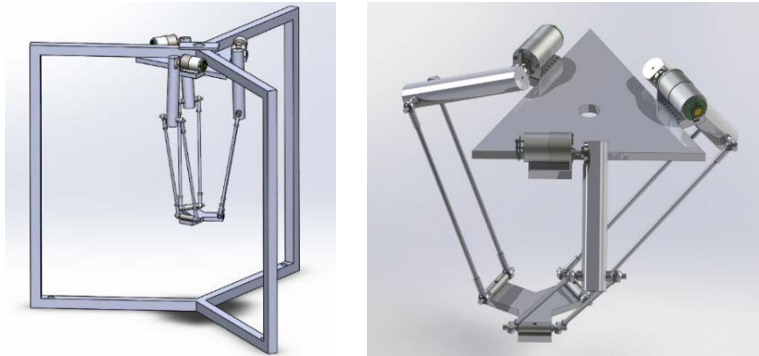


Figura 7 Simulación del robot Delta en SolidWorks.

#### Construcción del robot Delta

Para el proceso de construcción del robot Delta lo primero que se realizó fue la armadura que es la pieza encargada de sostener todo el peso del robot y hacer que no se balancee cuando el robot este en pleno funcionamiento. Posteriormente, se realizó el maquinado de las bases superior e inferior. La base superior es la

encargada se sostener los motores, la inferior es la plataforma móvil que soporta el efector final, para posicionarlo adecuadamente dentro del espacio de trabajo. Se procedió a maquinar las tres extremidades que van directo a los motores y a maquinar las extremidades inferiores que sostienen la base menor. Para realizar las uniones entre la extremidad mayor y las extremidades menores es necesario utilizar juntas esféricas. Las juntas se tuvieron que comprar ya que existen bastantes dificultades como para maquinarlas. En la figura 8 podemos ver el ensamble final del robot Delta.



Figura 8 Robot Delta ensamble final.

### **Implementación del sistema**

En la figura 9 podemos se observan las partes que componen al robot delta. Para el caso del robot Delta en la parte del movimiento se utilizaron tres motores de DC como se muestra en la figura 10. Para la medición se ha utilizado un encoder por cada motor; y para el control hemos utilizado un microcontrolador PSOC 4 como se muestra en la figura 11. Para la transmisión de datos se utiliza un módulo bluetooth.

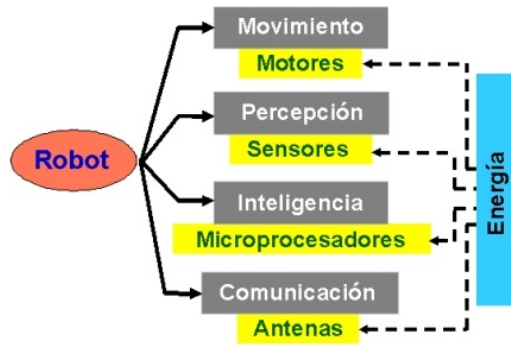


Figura 9 Componentes del prototipo de robot Delta.



Figura 10 Motor con caja de engranes y encoder de efecto Hall.



Figura 11 Microcontrolador PSOC 4 utilizado en el prototipo.

La figura 12 muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento del robot Delta. El robot se enlaza de forma inalámbrica a un teléfono inteligente donde podremos asignar movimientos del robot y activar el efector final, entre otras funciones.

### Resultados experimentales

El experimento realizado para comprobar el modelado cinemático del robot Delta consiste en el movimiento en una trayectoria vertical sobre un eje como se muestra en la figura 13, donde los tres motores tienen el mismo desplazamiento angular.

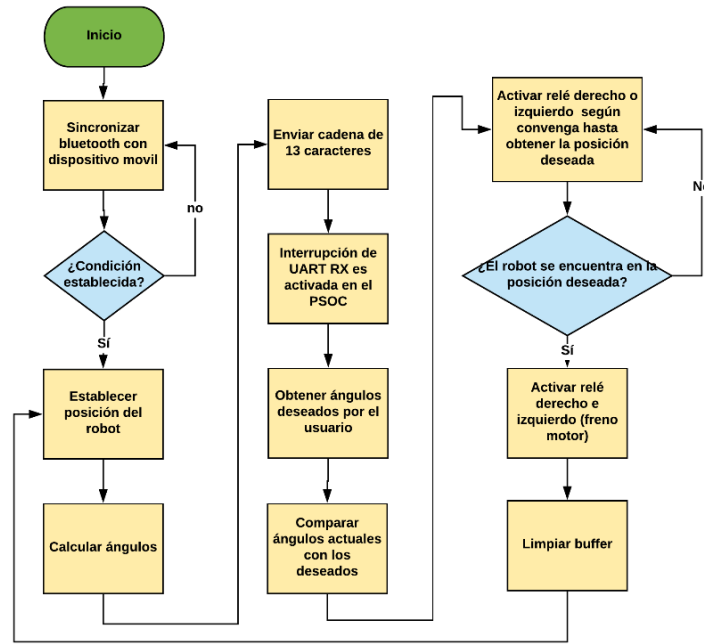


Figura 12 Diagrama de flujo del funcionamiento del robot Delta.

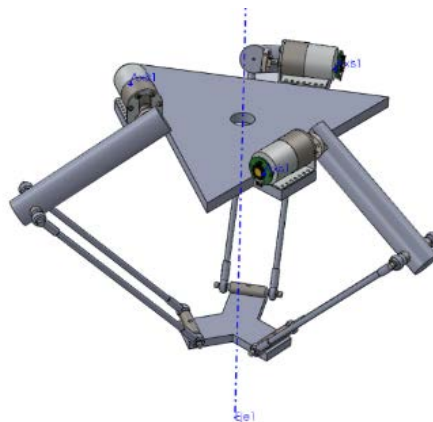


Figura 13 Desplazamiento sobre un eje imaginario.

En el software SolidWorks se realizó la simulación del robot Delta con las mismas medidas con las que se construyó el robot sin considerar aspectos inerciales. Para realizar la simulación se utilizó la herramienta “Motion” que permite realizar el análisis cinemático.

Una vez establecidos todos los parámetros del robot paralelo tipo Delta, se procedió a realizar el cálculo del análisis de movimiento y se obtuvieron las gráficas del desplazamiento angular de todos los motores como se muestra en la figura 14 y la gráfica del desplazamiento lineal entre ambas bases como se muestra en figura 15.

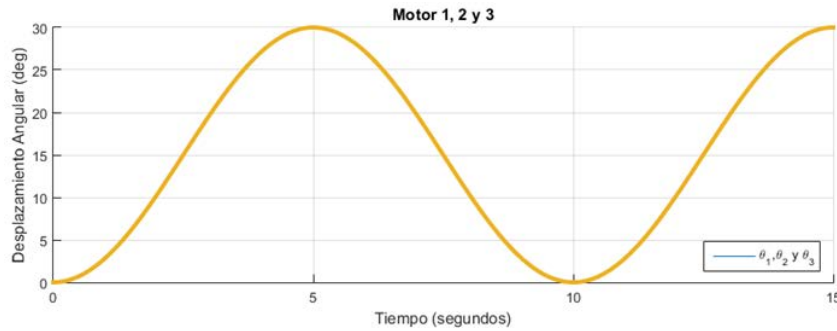


Figura 14 Desplamiento angular de los motores sobre un eje central en SolidWorks.

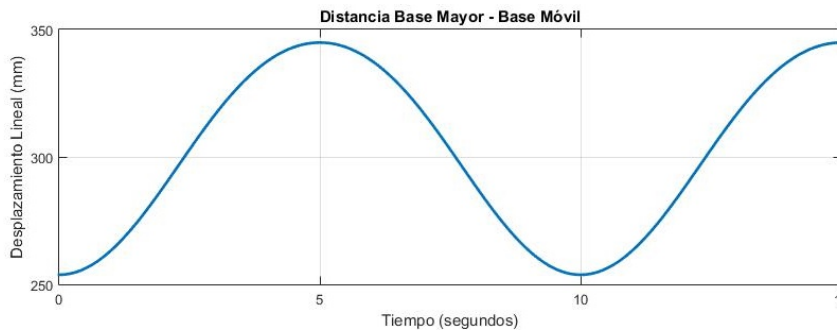


Figura 15 Desplamiento lineal entre ambas bases en SolidWorks.

Como se pueden observar en figuras 14 y 15, los motores se están desplazando siempre la misma magnitud con relación al cambio de desplazamiento entre la base fija (donde se asientan los motores) y la base móvil.

### Aplicación DeltaKinematics

La interfaz gráfica de la aplicación DeltaKinematics, diseñada para teléfonos con sistema operativo Android, se muestra en la figura 16. La aplicación se utilizó para monitoreo experimental de ángulos a través de la asignación de las posiciones deseadas utilizando la cinemática inversa.

Dentro de la aplicación se puede ver los parámetros de robot Delta que se utilizaron para el cálculo de la cinemática inversa. El sistema permite modificar los parámetros correspondientes a las medidas del robot Delta. Los experimentos que se realizaron para demostrar el funcionamiento del robot Delta fueron a través de la comparación de ángulos obtenidos a través de la simulación en SolidWorks, la aplicación DeltaKinematics y la obtención física de datos.

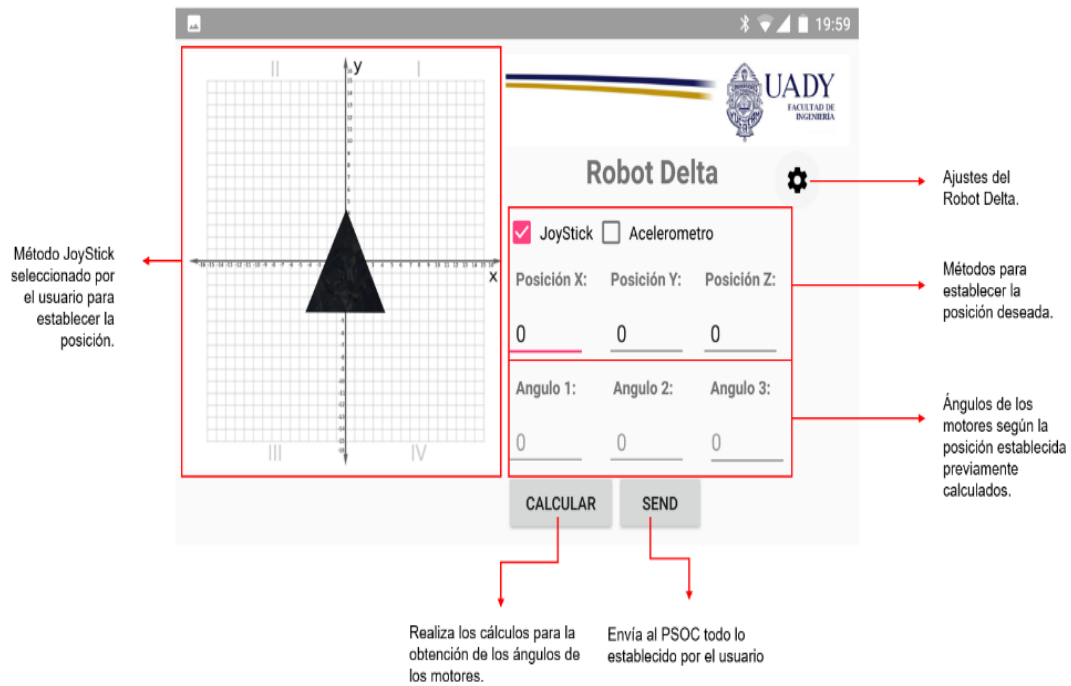


Figura 16 Interfaz gráfica de la aplicación DeltaKinematics.

Para el registro de datos lo que se realizó fue establecer una posición determinada a través de la aplicación DeltaKinematics y medir físicamente el ángulo en el que se encontraban los motores usando el acelerómetro de un dispositivo móvil; también se midió la distancia entre bases a través de un flexómetro. Los resultados obtenidos en todas las pruebas se muestran a continuación en la tabla 1.

Tabla 1 Resultados obtenidos de los tres experimentos.

SolidWorks		DeltaKinematics		Medición Física	
Distancia (cm)	Ángulo	Distancia (cm)	Ángulo	Distancia (cm)	Ángulo
14	-29.36	14	-29	14	-30
16	-16.91	16	-17	16	-16
18	-8.01	18	-8	17.5	0
20	0.02	20	0	20	6
22	7.22	22	7	22.6	10
24	13.81	24	14	25	19
26	21.13	26	21	26.2	23
28	26.90	28	27	28	30
30	34.00	30	34	30	37
32	41.11	32	41	32.5	46

## **4. Discusión**

Los resultados obtenidos que se muestran en tabla 1 tienen valores relativamente cercanos a los obtenidos en la simulación en SolidWorks y en la aplicación DeltaKinematics. Los valores desplegados muestran un comportamiento adecuado, ya que los valores experimentales son cercanos a los valores simulados; aunque era de esperarse que exista alguna diferencia entre los valores. La diferencia entre los valores es consecuencia de que el robot Delta diseñado no cuenta con ningún tipo de sistema control que asegure que los motores alcancen las posiciones deseadas. El rango de valores en los que se puede apreciar un comportamiento similar al de las simulaciones cumple para un desplazamiento entre los 14 a 30 cm.

## **5. Conclusiones**

Los resultados obtenidos son satisfactorios ya que se puede validar el modelado cinemático inverso con los resultados experimentales en un amplio espacio de trabajo. Existen ligeras diferencias en el desempeño debido a que el robot que se desarrolló no presenta un sistema de control que garantice al sistema a que el efector final llegue a la posición deseada.

El robot Delta fabricado muestra pequeñas imperfecciones que servirán como trabajo a futuro incluyendo un algoritmo de control para los motores. Los problemas que se desean resolver en un futuro sería realizar un remplazo de los motores de corriente directa que están instalados en el robot, por motores a pasos de alta precisión, otorgando movimientos más rápidos y precisos sin necesidad de utilizar un encoder por motor como actualmente se está utilizando en el robot. Otro trabajo a futuro sería implementación de un sistema de control que permita obtener una mayor precisión del efector final, que la obtenida en el apartado de resultados. También se busca obtener el modelo dinámico del robot Delta y la implementación de la cinemática directa en la aplicación DeltaKinematics.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Clavel, R. Conception d'un Robot Parallel Rapide a 4 degres de Liberte. Doctorado. Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, 1991.

- [2] Craig, J. *Robótica*. México: Pearson Educación, 2006.
- [3] Cervantes, J., Rico, J., Tadeo, A. y Pére, G. The kinematics designs of spatial, hybrid closed chains including planar parallelograms. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(3), 614-626, 2011.
- [4] Chkhartishvili, L. y Suryamurthy, G. Volume of intersection of six spheres: A special case of practical interest. *Nano Studies*, 11, 111-126, 2015.
- [5] Merlet, J. *Parallel robots*. Dordrecht Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 2006.
- [6] Pedraza, M. F., Cárdenas, P. F., Rodríguez, F. J., y Yime, E. Aproximación al diseño de robots paralelos, análisis de caso del robot delta. *IV Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica y Automatización CIIMA*, pp. 216-224, 2015.
- [7] Reynoso, G. y Favela, A. Maximización del espacio de trabajo en un robot manipulador paralelo tipo Delta con actuadores lineales. *Memorias del Congreso Nacional de la Asociación Mexicana de Control Automático, AMCA*, 2005.
- [8] Rueda, J. Metodología para el diseño de un robot paralelo industrial tipo Delta. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucamaranga, Colombia, 2008.
- [9] Stewart, D. A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 180(1), 371-386, 1965.
- [10] Williams, R. *The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions*. Mechanical Engineering, Ohio University, 2016.



# **SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EXTENDER EL TIEMPO DE OPERACIÓN DE UNA AERONAVE NO TRIPULADA**

## *PHOTOVOLTAIC SYSTEM TO EXTEND THE OPERATION TIME OF AN UNMANNED AIRCRAFT*

***Israel De Santiago Talavera***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*al134235@alumnos.uacj.mx*

***Abimael Jiménez Pérez***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*al134235@alumnos.uacj.mx*

***Geovani E. García***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*al134235@alumnos.uacj.mx*

***Ángel Saucedá Carvajal***

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*al134235@alumnos.uacj.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se realiza un estudio de factibilidad para integrar un sistema fotovoltaico a una aeronave no tripulada con la finalidad de extender el tiempo de operación. El sistema se diseñó con un arreglo en serie de celdas fotovoltaicas flexibles, el cual incluye un convertidor DC-DC para adaptar el voltaje de salida al voltaje de operación de la aeronave. La energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico operó satisfactoriamente en conjunto con la batería de la aeronave; suministrando la potencia necesaria para mantener un vuelo nivelado. Se desarrolló un sistema de medición basado en Arduino y sensores de voltaje y corriente para monitorear el consumo de potencia de la aeronave, la potencia generada por el sistema fotovoltaico y el tiempo máximo de operación de la aeronave.

**Palabras Claves:** Arduino, celdas fotovoltaicas, sistema híbrido, vehículo aéreo no tripulado.

## **Abstract**

*In this work, is carried out a study to integrate a photovoltaic system into an unmanned aircraft in order to extend the flight time. The system was designed with a series arrangement of flexible photovoltaic cells, which includes a DC-DC converter to adapt the output voltage to the operating voltage of the aircraft. The electrical energy generated by the photovoltaic system operated satisfactorily in conjunction with the aircraft's battery; providing the necessary power that keeps the aircraft in level flight. A measurement system based on Arduino and sensors of voltage and current was developed to monitor the power consumption of the aircraft, the power generated by the photovoltaic system and the maximum operating time of the aircraft.*

**Keywords:** *Arduino, hybrid system, photovoltaics cells, unmanned aircraft vehicle.*

## **1. Introducción**

Un vehículo aéreo no tripulado o UAV (del inglés: Unmanned Aircraft Vehicle) es una aeronave la cual es operada a distancia sin la necesidad de llevar un piloto a bordo [García, 2013]. En el transcurso de las últimas décadas ha ido en aumento el uso de este tipo de aeronaves, principalmente en misiones de reconocimiento y mapeo de terrenos, las cuales demandan un tiempo de operación alto. Una forma de ampliar este tiempo es incrementando la capacidad de las baterías o mejorando la eficiencia aerodinámica de la aeronave. La desventaja de utilizar baterías adicionales se encuentra en la contaminación que generan sus residuos. De igual manera, se incrementa el peso, reduciendo la carga útil de la aeronave.

Con la implementación de un sistema fotovoltaico en una aeronave no tripulada se puede obtener una aeronave híbrida, donde el beneficio principal es el incremento de tiempo de vuelo sin incrementar los residuos contaminantes. Otra de las ventajas es que aumenta su autonomía, al no depender de una toma eléctrica para su recarga, dándole la capacidad de ser utilizada en áreas remotas.

En este trabajo se integra un arreglo de celdas fotovoltaicas en el extradós del ala de una aeronave, el cual trabaja en conjunto con la batería para generar la potencia necesaria que mantiene a la aeronave en vuelo nivelado. Esto se realiza con la

finalidad de estudiar y analizar si es posible incrementar el tiempo de operación de la aeronave.

### **Vehículo aéreo no tripulado**

Dentro de los vehículos aéreos no tripulados existen tres configuraciones distintas: de ala fija, helicóptero (rotor individual) y multi-rotor [Quan, 2017]. Lo más importante en las operaciones mencionadas anteriormente es el tiempo de duración en vuelo que la aeronave puede ofrecer. Esta es la principal razón por la que se utilizan aeronaves de ala fija (figura 1), debido a que esta configuración presenta menor consumo energético y mayor eficiencia aerodinámica en comparación con las configuraciones de helicóptero y multi-rotor.



Figura 1 Vehículo aéreo no tripulado de ala fija.

Las fuentes de energía que utilizan las aeronaves de ala fija se dividen en tres tipos; química (batería), combustible y celda de combustible. Dependiendo del tipo de fuente de energía, se deriva la planta motriz con la que cuenta la aeronave, pudiendo ser eléctrica o de combustión interna. En este trabajo se utiliza la batería como fuente de energía primaria y el sistema fotovoltaico como fuente secundaria. El sistema electrónico de la aeronave no tripulada está conformado por un sistema de propulsión y un sistema de control. El motor y el controlador de velocidad forman parte del sistema de propulsión; mientras que, los servomotores y el receptor forman parte del sistema de control.

## **Sistema fotovoltaico**

Una celda fotovoltaica (CFV) recibe la luz solar y la convierte directamente en electricidad. La primera celda con una Eficiencia de Conversión de Energía (ECE) del 6 % se fabricó en la década de los 50 en los laboratorios Bell [Perlin, 2002]. La industria de CFV ha estado creciendo desde la década de los 80.

El componente clave de un sistema fotovoltaico es la CFV, la cual se basa en un dispositivo semiconductor capaz de convertir la energía solar en energía eléctrica. En el efecto fotovoltaico se establece que un par electrón-hueco es generado en el material semiconductor cuando éste absorbe un fotón de la luz incidente con una energía igual o mayor a la energía de brecha ( $E_g$ -Energy GAP) del material semiconductor [Khartchenko, 2013].

La primera generación de CFV eran celdas que se fabricaron con silicio monocristalino o policristalino, las cuales utilizaban una gran cantidad de material y eran demasiado caras para cualquier aplicación. Esto planteó la idea de desarrollar otro tipo de celdas, y es cuando surge la segunda generación de CFV, que también, se conoció como CFV de película delgada. La idea fue obtener un material de película muy delgada que tuviera propiedades fotoconductoras para sustituir todo el sustrato (bulk) que se utilizaba en las celdas de la primera generación. Existen varias tecnologías de película delgada tales como silicio amorfo (a-Si:H), seleniuro de galio indio cobre (CIGS) y otras. Sin embargo, muchas de estas tecnologías presentan algún tipo de inestabilidad. Entonces surge la tercera generación, tecnología aún está en investigación. Ésta además de ser de bajo costo y de película delgada; también utiliza los materiales más baratos, las películas más delgadas y las temperaturas más bajas.

En este trabajo se utilizaron CFV de silicio monocristalino de película delgada, correspondientes a la segunda generación. El parámetro más importante de una CFV es la eficiencia de conversión de energía ( $ECE$ ) definida por la ecuación 1 como la razón de la máxima potencia eléctrica de salida ( $P_{max}$ ) y la potencia luminosa incidente ( $P_{in}$ ).

$$ECE = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (1)$$

Para calcular la *ECE* de una CFV es necesario determinar el voltaje del circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ) y el factor de llenado eléctrico (FF). Como se observa en la figura 2 el voltaje  $V_{oc}$  es el voltaje máximo disponible de una CFV y esto ocurre cuando la corriente a través de la CFV es igual a cero.  $I_{sc}$  es la corriente a través de la CFV cuando el voltaje a través de ésta es cero.

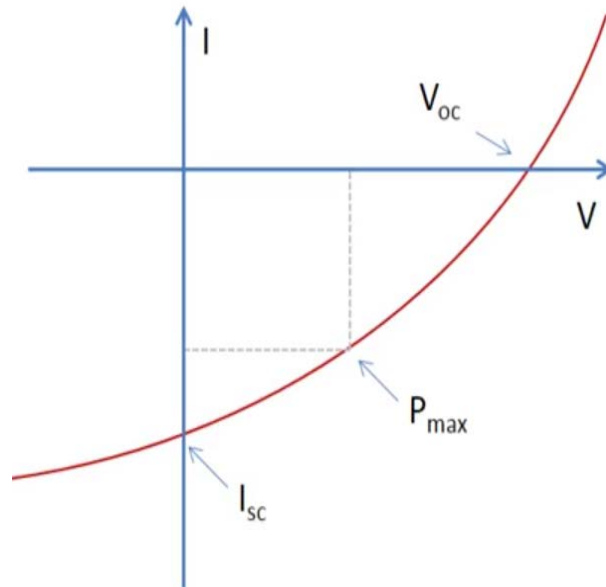


Figura 2 Características I-V de una celda fotovoltaica con los parámetros  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ , y  $P_{max}$ .

## 2. Métodos

Para evaluar el incremento del tiempo de vuelo con la integración del sistema fotovoltaico en la aeronave; primero fue necesario elegir la aeronave. Posteriormente, se determinó el consumo de potencia mínima en vuelo nivelado. Después se determinó la potencia generada por las CFV en tierra. Finalmente, se determinó el tiempo máximo de operación de la aeronave al combinar la energía proporcionada por la batería y el sistema fotovoltaico. A continuación, se definen cada una de las etapas del diseño del sistema y los experimentos.

### Aeronave no tripulada

Para seleccionar la aeronave, el principal criterio fue que debía ser una aeronave de ala fija con la mayor superficie alar disponible, y que a su vez fuera una superficie

sólida para facilitar la integración del sistema fotovoltaico en la estructura. La aeronave elegida fue el modelo Volantex Phoenix Evolution 2600, la cual se muestra en la figura 1. En la tabla 1 se enlistan los componentes de la aeronave.

Tabla 1 Componentes de la aeronave no tripulada Volantex Phoenix Evolution 2600.

Componente	Modelo
Motor	Volantex 4023/850 kV
Servomotor (4)	Volantex Ranger EX (9 g)
Controlador de velocidad	Volantex EP-40
Receptor	FS-R6B
Hélice	APC 1365
Batería	Turnigy Graphene 1.0 A 3S

### Sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico está conformado por 16 CFV Sunpower Maxeon de segunda generación, las cuales se adaptan perfectamente a la estructura del ala debido a que éstas son flexibles. Las especificaciones de las CFV se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Especificaciones y parámetros de la celda Sunpower Maxeon.

Especificaciones físicas					
Semiconductor		Silicio monocristalino			
Tecnología		Película delgada (Generación II)			
Área		156.25 cm <sup>2</sup>			
Peso		6.5 g			
Espesor		150 µm			
Parámetros eléctricos					
<i>Pmp</i> (W)	<i>η</i> (%)	<i>Vmp</i> (V)	<i>Imp</i> (A)	<i>Voc</i> (V)	<i>Isc</i> (I)
3.41	22.3	0.576	5.92	0.678	6.29

El arreglo de CFV se colocó en el extradós del ala como se observa en la figura 3. Se distribuyeron 2 arreglos de CFV de 8 celdas cada uno (por semi ala) a lo largo de la envergadura de la aeronave, cubriendo totalmente la superficie del ala. Se realizó una interconexión en serie de las celdas y se les colocó un conector tipo TX-60. Para ajustar el voltaje de salida del arreglo de las CFV al voltaje de operación de la aeronave (11.1 V), se utilizó un convertidor DC-DC Boost modelo Tusotek TS-IPS-V03.

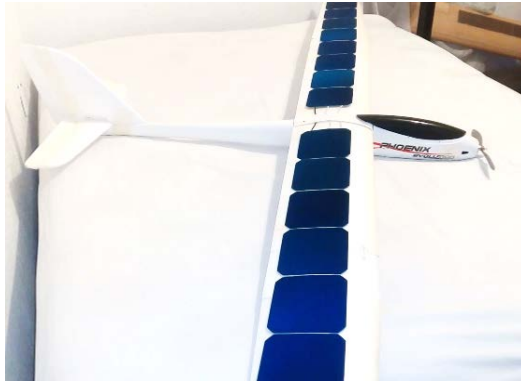


Figura 3 Arreglos de celdas fotovoltaicas en el extradós del ala de la aeronave Volantex Phoenix Evolution 2600.

### Sistema de medición

Un microcontrolador Arduino Mega 2560 fue el utilizado para almacenar los datos del consumo de potencia de la batería y del sistema fotovoltaico en los diferentes experimentos (en tierra y en vuelo). Se utilizaron dos sensores de voltaje N103, dos sensores de corriente ACS712-30A y un módulo de memoria SD en donde fueron almacenadas las lecturas cada 0.76 segundos. Para mayor fiabilidad todos los componentes del sistema de medición se integraron en un módulo que fue impreso en 3D como se observa en la figura 4. En el diagrama a bloques de la figura 5 se muestra la conexión entre los componentes del sistema electrónico de la aeronave, el sistema fotovoltaico y el sistema de medición.

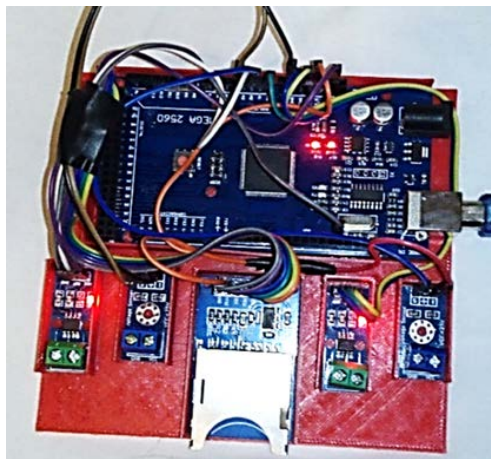


Figura 4 Sistema de medición basado en Arduino con sensores de voltaje y corriente.

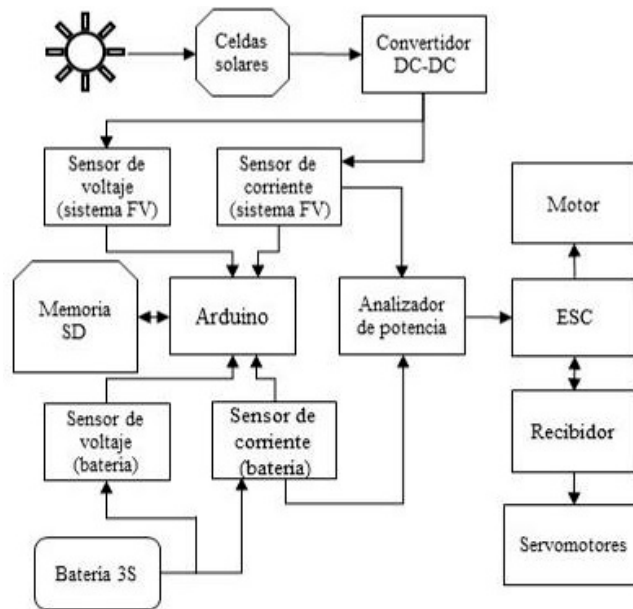


Figura 5 Diagrama a bloques de sistema electrónico de aeronave y sistema de medición.

Por otra parte, las mediciones de la radiación solar y el ángulo de incidencia, así como la temperatura en el área de prueba no fueron necesarias, esto debido a la naturaleza de operación de una aeronave, ya que esta se mantiene en constante movimiento y por consecuencia estas variables no pueden ser medidas estáticamente.

### Potencia mínima en vuelo nivelado

En el experimento para determinar la potencia mínima en vuelo nivelado no se integró el sistema fotovoltaico a la aeronave para no dañar las celdas si esta sufría un accidente. Sin embargo, aunque la presencia del sistema fotovoltaico no es necesaria, si lo es su peso, debido a que mientras mayor carga lleve la aeronave mayor es su consumo de energía. Por esta razón se agregó un peso de 104 gramos que simulan el peso que el sistema fotovoltaico añade a la aeronave. Con esta condición la aeronave consume la energía como si tuviera el sistema fotovoltaico instalado. De lo contrario, las lecturas de consumo de potencia hubieran sido inferiores y erróneas.

En cuanto al sistema de medición, se incorporó el microcontrolador Arduino con un sensor de voltaje y un sensor de corriente para determinar la potencia mínima



consumida por la aeronave en vuelo. Los datos fueron almacenados en la memoria SD cada 0.76 segundos, esto debido a que se programó con un retraso entre lecturas de 0.5 segundos al cual se le suma el tiempo que tarda el microcontrolador en realizar las operaciones. En el momento del experimento, se lanzó la aeronave manualmente con la potencia máxima debido a que no cuenta con tren de aterrizaje y es imposible realizar un carreteo (figura 6). Posteriormente, se redujo la potencia hasta verificar la velocidad de pérdida, para después aumentar la potencia con un margen de seguridad que mantuviera a la aeronave estable y en vuelo nivelado. El control de la aeronave se realizó mediante el transmisor FlySky FS-4TB.



Figura 6 Ensayo de vuelo.

### **Potencia máxima del sistema fotovoltaico**

El experimento de potencia máxima del sistema fotovoltaico fue realizado el 21 de abril del 2018 a las 12:00 horas tiempo local en Ciudad Juárez, Chihuahua. Al momento del experimento se colocó a la aeronave en una posición donde las CFV estuvieran paralelas a la superficie para simular la posición de la aeronave en vuelo nivelado (figura 7).

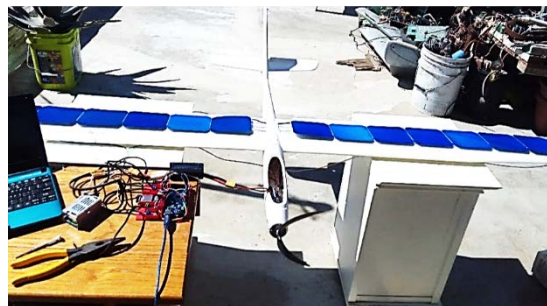


Figura 7 Ensayo de potencia máxima del sistema fotovoltaico.

De igual manera que el ensayo de vuelo, se utilizó un sensor de voltaje y un sensor de corriente para determinar la potencia máxima generada por el sistema fotovoltaico (en tierra).

### **Tiempo máximo con la batería**

Con una batería Turnigy de grafeno con una capacidad de 1000 mAh y un voltaje de operación de 11.1 V, se realizó el ensayo a la potencia mínima determinada previamente en vuelo nivelado. El tiempo máximo se define por el intervalo donde la potencia mínima es alcanzada y mantenida hasta que el voltaje de la batería cae por debajo de 9.6 V.

### **Tiempo máximo de operación con el sistema híbrido**

Para determinar qué tanto se logra extender el tiempo de vuelo al integrar el sistema fotovoltaico en la aeronave fue necesario realizar un ensayo de potencia en conjunto con la batería (sistema híbrido). Así, la diferencia de tiempo entre este ensayo y el realizado únicamente con la batería; nos dará el aumento en el tiempo de vuelo proporcionado por el sistema fotovoltaico.

## **3. Resultados**

En esta sección se presentan los principales resultados de la integración de un sistema fotovoltaico en la aeronave no tripulada Volantex Phoenix Evolution 2600. Primero se presentan los resultados del consumo de potencia mínimo en vuelo nivelado y se compara con la potencia del sistema fotovoltaico en tierra. Posteriormente se presenta el análisis del rendimiento de la batería y; finalmente, se muestran los resultados del sistema híbrido (operación de la aeronave con batería y sistema fotovoltaico).

### **Potencia de consumo mínima en vuelo nivelado**

En la figura 8 se observa el consumo de potencia de la aeronave en función del tiempo. En este experimento se determinó la potencia mínima de vuelo nivelado. Como se observa en los primeros 5 segundos, la potencia es la máxima que puede

consumir la aeronave porque es cuando se realiza el lanzamiento manual. Posteriormente, se redujo la potencia a ~150 W (5 a 11 segundos) y después a 60 W (segundo 12). Sin embargo, debido a obstáculos en el área de prueba se volvió a incrementar la potencia para maniobrar y elevar la aeronave. Finalmente, se logró estabilizar la aeronave a 60 W de potencia aproximadamente (después del segundo 22). Potencia que se determinó como la mínima necesaria para mantener un vuelo nivelado con clima estable.

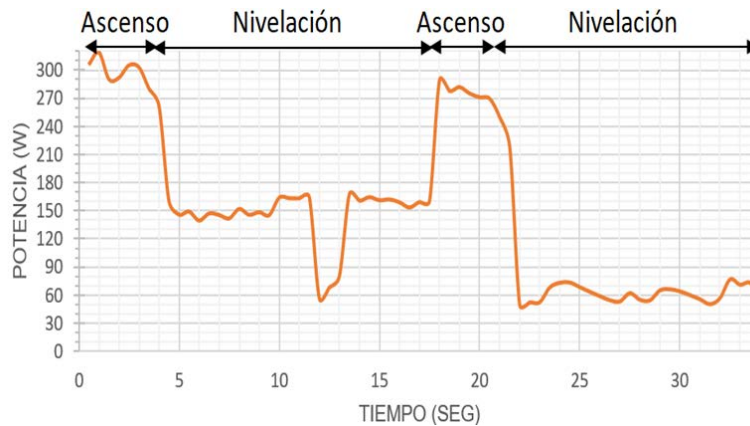


Figura 8 Potencia-tiempo de aeronave Volantex Phoenix Evolution 2600 en vuelo.

### Potencia del sistema fotovoltaico

El 21 de abril de 2018 a las 12:00 horas tiempo local, se obtuvo una potencia máxima promedio de 45 W como se observa en la figura 9. En esta misma gráfica se observa que mientras mayor potencia le demande la aeronave al sistema fotovoltaico mayor es su variación en función del tiempo (10 a 60 segundos); lo cual representa un inconveniente para la aeronave. Por lo tanto, operar la aeronave en los límites que puede generar el sistema fotovoltaico es inseguro, por lo que se redujo la demanda de potencia a 40 W donde se comprobó que la potencia se muestra más estable (60 a 100 segundos).

En la figura 9 también se observa que la corriente se mantiene casi estable todo el tiempo; mientras que el voltaje presenta variaciones, inclusive a 40 W de potencia. Aun así, el voltaje del sistema fotovoltaico a esta potencia es muy bajo en comparación con la batería.

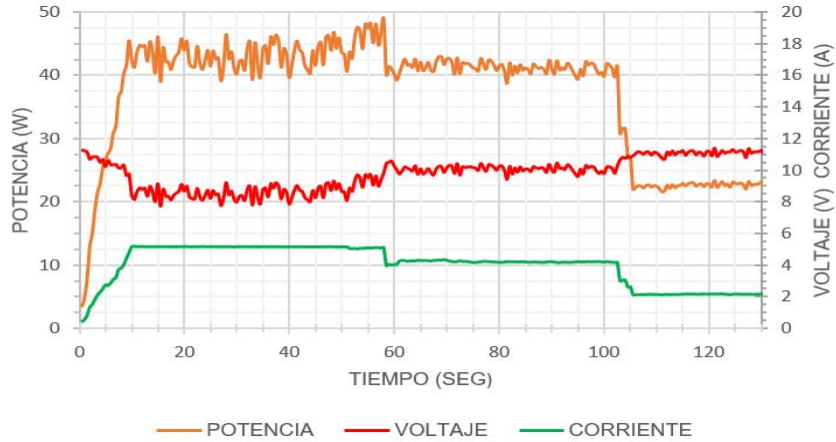


Figura 9 Curva de potencia máxima del sistema fotovoltaico.

### Rendimiento de la batería

Con una batería de 11.1 V y una capacidad de 1000 mAh que opere a una potencia de 60 W aproximadamente, el tiempo que puede durar la aeronave en servicio es de 522 segundos como se observa en la figura 10. A partir de 480 segundos el voltaje empieza a decaer drásticamente para llegar a un voltaje de 9.6 V en 522 segundos.

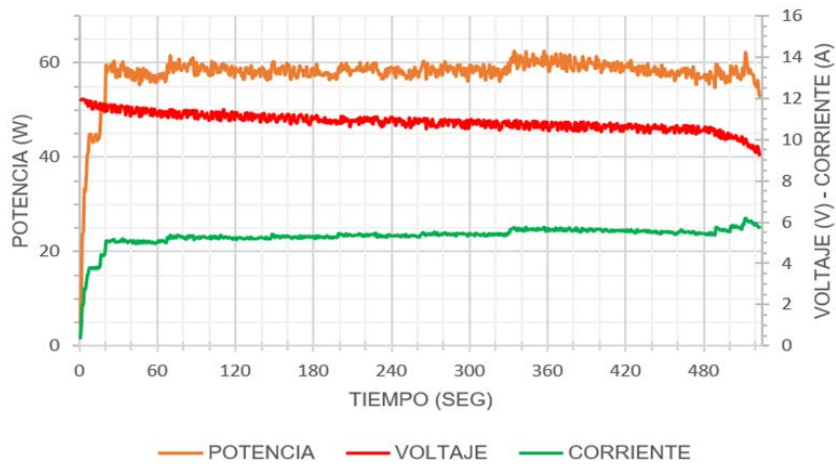


Figura 10 Tiempo máximo de operación con la batería.

### Sistema híbrido

Con la implementación del sistema fotovoltaico en la aeronave se logró aumentar el tiempo de vuelo en un 36%; es decir, 188 segundos antes de que el voltaje del sistema híbrido cayera por debajo de 9.6 V. Entonces, el tiempo máximo del sistema

híbrido fue de 710 segundos como se observa en la figura 11. En la gráfica de la figura 11 también se observan los ciclos de carga y descarga de la batería mediante el sistema fotovoltaico. Primero se descarga la batería hasta 9.6 V y posteriormente se reduce la potencia a 0 W para comprobar que el sistema fotovoltaico puede cargar la batería.

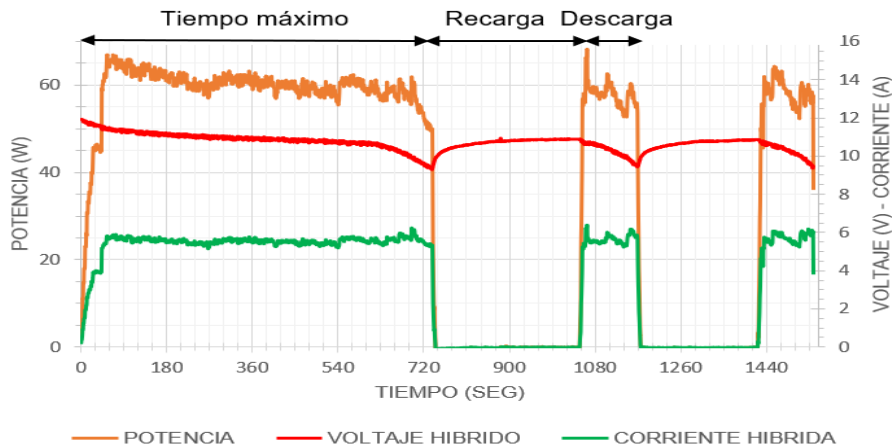


Figura 11 Curva de potencia del sistema híbrido.

Debido a que al inicio el potencial de la batería es de 12 V el sistema fotovoltaico no tiene participación en la generación de energía para la aeronave como se observa en la figura 12.

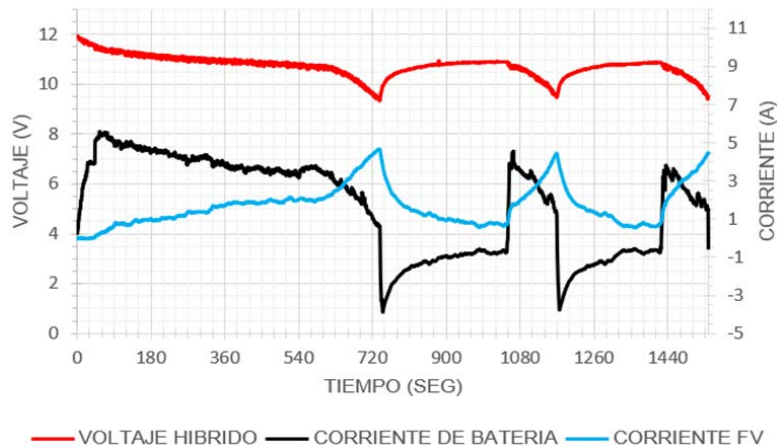


Figura 12 Curvas de corriente del sistema híbrido.

Conforme el voltaje de la batería se reduce debido al consumo de energía de la aeronave, el flujo de corriente del sistema fotovoltaico se incrementa hasta llegar un punto donde la corriente es superior a la de la batería y, debido a que el sistema fotovoltaico no puede suministrar los 60 W demandados por la aeronave; la potencia se pierde y la aeronave ya no puede seguir en vuelo nivelado. En la figura 12 también se observa que cuando se reduce la potencia a 0 W, la corriente del sistema fotovoltaico alimenta a la batería totalmente, logrando recargarla, pero en un tiempo mayor a su tiempo de descarga.

#### **4. Discusión**

Los valores experimentales de la potencia generada por el sistema fotovoltaico difieren de los valores teóricos proporcionados por el fabricante. En condiciones estándar el fabricante ofrece 54.4 W de potencia, pero solo se obtuvieron 40 W con oscilaciones de voltaje. Esto es entendible debido a que no hubo forma de replicar las mismas condiciones en las que se evalúan las CFV en los laboratorios por falta de equipo especializado.

Es importante señalar que el sistema fotovoltaico logra aumentar el tiempo de operación de la aeronave, pero la ganancia de tiempo no es considerable para alguna aplicación real. De igual manera, el tiempo de descarga de la batería es inferior al tiempo de carga, lo que refleja que el sistema fotovoltaico no genera la suficiente energía para la aeronave.

Si se redujera el consumo de potencia de la aeronave o si se aumentara la potencia del sistema fotovoltaico, el incremento de tiempo de vuelo sería mayor.

#### **5. Conclusiones**

La implementación de un sistema de CFV en el extradós del ala de la aeronave Volantex Phoenix Evolution 2600 fue factible. La implementación de un sistema fotovoltaico en una aeronave para extender el tiempo de operación es viable si, y solo si, la potencia generada por el sistema fotovoltaico es superior a la potencia consumida por la aeronave durante todo el plan de vuelo. La potencia generada por el sistema fotovoltaico siempre estará limitada por el área disponible en la aeronave.

Por lo tanto, existe un compromiso entre el área disponible de la aeronave y el proporcional incremento del consumo de potencia de la aeronave, al incrementarse el tamaño de las alas. Es preferible que el sistema fotovoltaico tenga la capacidad de generar el voltaje de operación de la aeronave para evitar el uso de convertidores DC-DC. El voltaje generado por el sistema fotovoltaico también debe ser superior al de la batería para que éste tenga participación en la generación de la energía que demanda la aeronave; de lo contrario, solo tendrá contribución cuando el voltaje de la batería se reduzca.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Breeze, P. (2014). *Power generation technologies*. Newnes.
- [2] D'Sa, R., Jenson, D., Henderson, T., Kilian, J., Schulz, B., Calvert, M., Heller, T., & 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). (octubre 01, 2016). SUAV:Q - An improved design for a transformable solar-powered UAV. 1609-1615.
- [3] García, C. L. R., Dzul, L. A. E., Lozano, R., & Pégard, C. (2013). *Quad Rotorcraft Control: Vision-Based Hovering and Navigation*. London: Springer.
- [4] Gudmundsson, S. (2014). *General Aviation Aircraft Design: Applied Methods and Procedures*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- [5] Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications*. Amsterdam: Elsevier.
- [6] Keane, J. (2014). *Pico-solar electric systems: The Earthscan expert guide to the technology and emerging market*. Oxfordshire, England: Routledge.
- [7] Khartchenko, N. V., & Kharchenko, V. M. (2013). *Advanced energy systems*. CRC Press.
- [8] Kundu, A. K. (2014). *Aircraft design*. Cambridge: Cambridge University Press.
- [9] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* Chichester, West Sussex, U.K: Wiley.
- [10] Morton, S., D'Sa, R., Papanikolopoulos, N., & 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). (septiembre 01, 2015). Solar powered UAV: Design and experiments. 2460-2466.

- [11] Mateus, M., Camilo, B., Pulecio Gómez, A. F., & Ruíz Arenas, S. (2017). Diseño y construcción de un vehículo aéreo no tripulado tipo planeador de ala recta, con paneles solares (Bachelor's thesis, Universidad Militar Nueva Granada).
- [12] Park, H. B., Lee, J. S., Yu, K. H., & 2015 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE). (julio 01, 2015). Experiment and evaluation of solar powered UAV by virtual flight system. 1052-1057.
- [13] Perlin, J. (2002). From space to earth: The story of solar electricity. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- [14] Quan, Q. (2017). Introduction to multicopter design and control. Singapore: Springer.
- [15] Rajendran, P., & Smith, H. (enero 01, 2014). The Development of a Small Solar Powered Electric Unmanned Aerial Vehicle Systems. Applied Mechanics and Materials, 345-351.
- [16] Sai, L., Wei, Z., & Xueren, W. (marzo 01, 2017). The Development Status and Key Technologies of Solar Powered Unmanned Air Vehicle. Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, 187, 12011.
- [17] Scarpino, M. (2015). Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines. Que Publishing.
- [18] Stapleton, G., & Neill, S. (2012). Grid-connected solar electric systems: the earthscan expert handbook for planning, design and installation. Routledge.
- [19] White, S. (2015). Solar photovoltaic basics: A study guide for the NABCEP entry level exam. Oxfordshire, England: Routledge.



# **MICRÓFONO VOCAL CON RESPUESTA EN FRECUENCIA ADAPTABLE**

## **VOCAL MICROPHONE WITH ADAPTABLE FREQUENCY RESPONSE**

**René Erik Estrada Chávez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*r.estrada.ch@outlook.com*

**Carlos Avilés Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*caviles@azc.uam.mx*

**Juan Villegas Cortez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*juanvc@azc.uam.mx*

**Arturo Zúñiga López**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*azl@azc.uam.mx*

### **Resumen**

Dentro de la industria del audio profesional, existen varios tipos de micrófonos, entre los más importantes se tienen: los vocales, para instrumentos, para grabación, para medición, para radiodifusión, etc. Por su uso y características, el micrófono vocal ha tomado especial importancia para eventos públicos. En el presente artículo se aborda el análisis, diseño y construcción de un micrófono vocal del tipo “respuesta adaptable”. El sistema del micrófono vocal está integrado por tres elementos, un sensor-transductor que convierte señales sonoras a señales eléctricas, un elemento de procesamientos digital de señales basado en el microcontrolador PIC16F628A y por último, un sistema de configuración basado en una aplicación para dispositivo móvil vía Bluetooth. En el sistema aquí propuesto se diseñaron y construyeron tanto la fuente de operación como el circuito impreso. El sistema permite la configuración de la respuesta en frecuencia a través de un ecualizador de 5 bandas, existe la posibilidad de establecer respuestas en frecuencia precargadas o bien definiendo cada usuario su propia

respuesta. Cabe destacar que el sistema propuesto opera en tiempo real. Se presentan resultados tanto teóricos como experimentales de la respuesta en frecuencia.

**Palabras Claves:** Diseño de filtros, micrófono vocal, procesamiento digital de audio, procesamiento digital de señales.

## **Abstract**

*In the professional audio industry, there are several types of microphones, the most important are: vocals, for instruments, for recording, for measuring, for broadcasting, among others. Because of its use and characteristics, the vocal microphone has taken special importance for public events. This article presents the analysis, design and construction of a vocal microphone. The vocal microphone system consists of three elements, a sensor-transducer that converts sound signals to electrical signals, a digital signal processing element based on the PIC16F628A microcontroller and finally, a configuration system based on a Bluetooth mobile device application. In the proposed system, both the power supply and the printed circuit were designed and built. The system allows the configuration of the frequency response through a 5-band equalizer, there is the possibility of establishing pre-loaded frequency responses or defining each user's own response. It should be noted that the proposed system operates in real time. Finally, both theoretical and experimental results of the frequency response are presented.*

**Keywords:** Digital audio processing, digital signal processing, filter design, vocal microphone.

## **1. Introducción**

Dentro de la industria del audio profesional existen muchas marcas dedicadas a la fabricación de micrófonos profesionales, cada una de ellas cuenta con una gran gama de modelos especializados para ciertas aplicaciones, tales como los micrófonos vocales, para instrumento, para grabación, para medición, para radiodifusión (broadcast), etc [Shure, 2017].

Para que un micrófono pueda considerarse como vocal, debe cumplir con ciertas características, e.g. patrón de captación direccional, que contenga filtro anti-viento, que cumpla con una respuesta en frecuencia acorde a la voz, que cuente con sensibilidad acorde al nivel de presión sonora de la voz, que tenga bajo nivel de ruido, principalmente [Prandoni, 2008]. Los micrófonos vocales pueden tener 2 tipos de respuesta:

- Respuesta en frecuencia plana.
- Respuesta en frecuencia adaptable [Shure, 2017].

En los micrófonos vocales del tipo “frecuencia adaptable”, una de las características más relevantes es su respuesta en frecuencia, la cual determina qué bandas de frecuencia se resaltan o atenúan dentro del espectro de la voz [Davis, 1989]. Debido a que el timbre de la voz de cada persona es diferente, el sonido que se obtiene de cada micrófono es diferente, por lo que hay algunos micrófonos que se adaptaran mejor a la voz de cada persona [Shure, 2017]. Por ese motivo, un micrófono vocal con respuesta en frecuencia adaptable resulta ser de gran ayuda tanto para aquellos usuarios que desean una respuesta en frecuencia específica para su voz, como para aquellos usuarios que desean obtener la respuesta en frecuencia de algún modelo en particular de micrófono.

El dispositivo construido y descrito en este artículo está conformado por un ecualizador de 5 bandas, compuesto por un filtro pasa altas, 3 filtros pasa banda semi-paramétricos y un filtro supresor de banda, permitiendo adaptar la respuesta en frecuencia de un micrófono a la frecuencia deseada. El control de cada filtro se realiza vía Bluetooth mediante una aplicación diseñada para dispositivo móvil basado en sistema operativo Android.

## **2. Método**

La metodología propuesta se muestra en la figura 1, en donde se puede visualizar cada uno de los bloques constitutivos, así como sus componentes:

- **Micrófono:** Capta señales acústicas y las convierte en variaciones de voltaje. Se utilizó un micrófono Shure PG81 [Shure-4, 2017] debido a que presenta

una respuesta en frecuencia muy uniforme a lo largo del rango de frecuencia utilizado en micrófonos vocales. El rango de frecuencias que opera óptimamente este tipo de micrófonos es en el rango de 50 a 15000 Hz [Alton, 2015].

- **Banco de filtros:** Compuesto de 5 filtros que reciben la señal procedente del micrófono y las señales de control procedentes del bloque C, a la salida de este bloque se tiene la señal con respuesta en frecuencia modificada. Los filtros usados en el presente bloque se construyeron a partir del circuito integrado MF5CN de National Semiconductor.
- **Señales de control:** Brinda las señales de control necesarias para cada filtro, estas señales son enviadas por medio del microcontrolador PIC16F628A, y éste recibe los parámetros vía Bluetooth desde un dispositivo móvil basado en Android.
- **Preamplificador y acoplamiento de señales:** El objetivo en el presente bloque es adecuar la señal recibida del bloque B, para poder ser transmitida vía cable balanceado al bloque F. Aquí se utilizó el circuito integrado TL084 [Texas Instruments, 2017] para la amplificación, y el transformador de salida de un micrófono PG81 [Shure-4, 2017].
- **Receptor Bluetooth:** Recibe los parámetros de control provenientes del bloque G y los envía al bloque C, mediante la interfase serial UART del microcontrolador PIC16F628A.
- **Equipo profesional de audio:** Contempla todo el equipo necesario capaz de recibir las señales de audio provenientes del micrófono y amplificarlas por medio de un altavoz.
- **Parámetros de control vía Bluetooth:** Dispositivo móvil basado en Android, envía los parámetros (caracteres codificados ASCII) necesarios para controlar los filtros al bloque E vía Bluetooth usando una aplicación destinada específicamente para el uso del dispositivo.

El desarrollo del presente proyecto contempla el diseño, programación y construcción de los bloques B, C, D, E y G.

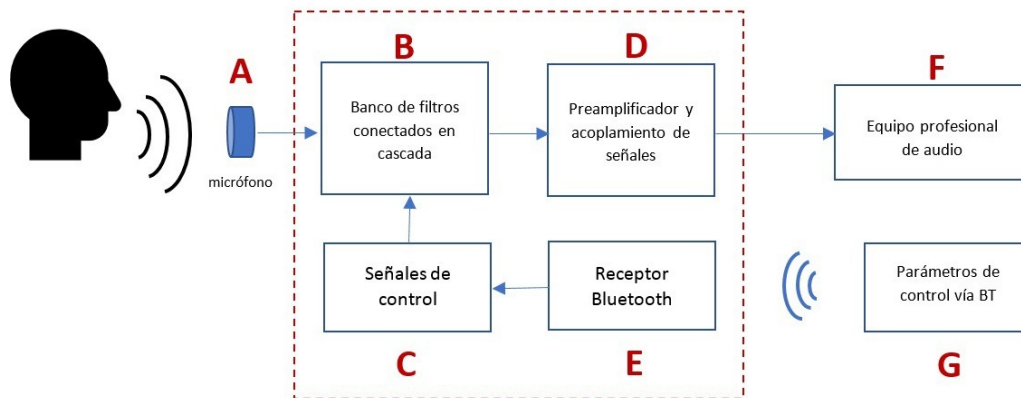


Figura 1 Metodología para el micrófono vocal con respuesta en frecuencia adaptable.

### Diseño del banco de filtros

Para la construcción y control de los parámetros del banco de filtros se utilizaron los siguientes circuitos integrados (CI):

- **CI MF5CN [National Semiconductor, 2017]:** Consiste en un filtro activo CMOS de 2do orden y un amplificador operacional no conectado, tal que, con un reloj externo y unas resistencias, pueden producir varios tipos de filtros de segundo orden.
- **CI MC1455P1G [ON Semiconductor, 2017]:** Es un controlador altamente estable capaz de producir retardos de tiempo y oscilación. En el modo de retardo de tiempo (monoestable), el tiempo es controlado con precisión por una resistencia externa y un capacitor. Para el modo oscilador (astable), la frecuencia y el ciclo de trabajo se controlan con dos resistencias externas y un capacitor.
- **CI X9C103P [Xicor, 2017]:** Es un potenciómetro no volátil de estado sólido de 10 k $\Omega$ , es ideal para el ajuste de resistencia controlada digitalmente. Consiste en una matriz de resistencia, compuesta por 99 elementos resistivos.

Para el banco de filtros, se utilizaron 3 tipos diferentes de filtros:

- **Filtro pasa Banda (BPF, por sus siglas en inglés).** En la tabla 1 se observan los modos de operación sugeridos por el fabricante. Para el diseño de los BPF, se eligió el modo de operación 1, debido al bajo número de componentes externos requeridos.

Tabla 1 Modos de operación del CI MF5CN [National Semiconductor, 2017].

Modo	BPF	LPF	HPF	NOTCH	APF	No. de resistores	fclk/fo ajustable
1	*	*		*		3	No
1a	*	*				2	No
2	*	*		*		3	Si
3	*	*	*			4	Si
3a	*	*	*	*		7	Si
4	*	*			*	3	No
5	*	*			*	4	
6a		*	*			3	
6b		*				2	

Para establecer los parámetros específicos para cada filtro, se usan las ecuaciones 1 a 5, las cuales permiten definir tanto su frecuencia central, sus frecuencias de corte y su factor de calidad, entre otros parámetros del diseño.

$$f_o = \frac{f_{clk}}{100} \quad (1)$$

$$H_{OLP} = -\frac{R2}{R1} \quad (2)$$

$$H_{OBP} = -\frac{R3}{R1} \quad (3)$$

$$H_{ON} = -\frac{R2}{R1} \quad (4)$$

$$Q = -\frac{R3}{R2} \quad (5)$$

Proponiendo una ganancia máxima de 20 dB, un  $Q = 1$  y  $R1 = 1 \text{ k}\Omega$ , se obtienen los valores de  $R2 = 10 \text{ k}\Omega$  y  $R3 = 10 \text{ k}\Omega$ .

Dado que la frecuencia central para el filtro diseñado está determinada por la frecuencia del oscilador externo, se diseñó un circuito basado en el circuito integrado MC1455P1G que genera dicha señal y es capaz de variarla dentro del intervalo de operación para cada banda. En la tabla 2 se muestra la frecuencia de reloj  $f_{clk}$  para cada 10 pasos de potenciómetro digital (RB) y la frecuencia central  $f_o$  resultante para el BPF 1, de acuerdo con los valores de RA, RB y C. Para los BPF 2 y BPF 3, se realizó un procedimiento similar con

los valores de  $RA$ ,  $RB$  y  $C$  correspondientes. De acuerdo a los resultados obtenidos, los intervalos teóricos de frecuencias  $f_0$  se muestran en la tabla 3.

Tabla 2 Valores teóricos para  $f_{clk}$  y  $f_0$ , a partir de  $RA$ ,  $RB$  y  $C$  para BPF 1.

RA [Ω]= 500 ; C [F]= 0.00000001						
Pasos del Pot. digital	Resistencia RB [Ω]	Tiempo en alto $t_H = 0.695 * C * (RA + RB)$ [s]	Tiempo en bajo $t_L = 0.695 * C * RB$ [s]	Ciclo de Trabajo [%]	Frecuencia del reloj [Hz]	$f_0$ del BPF [Hz]
0	40	3.74299E-06	2.77259E-07	93.10344828	248740.5243	2487.4052
10	1010	1.04665E-05	7.00079E-06	59.92063492	57249.80321	572.49803
20	2020	1.74673E-05	1.40016E-05	55.50660793	31777.42381	317.77423
30	3030	2.44681E-05	2.10024E-05	53.81097561	21992.30245	219.92302
40	4040	3.14689E-05	2.80031E-05	52.91375291	16814.62752	168.14627
50	5050	3.84697E-05	3.50039E-05	52.35849057	13610.33057	136.10330
60	6060	4.54705E-05	4.20047E-05	51.98098257	11431.8149	114.31814
70	7070	5.24712E-05	4.90055E-05	51.70765027	9854.474323	98.544743
80	8080	5.9472E-05	5.60063E-05	51.50060024	8659.634099	86.596340
90	9090	6.64728E-05	6.30071E-05	51.33832976	7723.206857	77.232068
99	9999	7.27735E-05	6.93078E-05	51.21963118	7038.223441	70.382234

Tabla 3 Rango de operación teórica para los filtros diseñados.

Filtro	Rango de operación teórica
BPF	70.38–2.48 kHz
BPF	0.68–13.35 kHz
BPF	3.84–18.93 kHz
HPF	64.12–559.18 Hz
Notch	709.70–35.18 kHz

- Filtro pasa Altas (HPF, por sus siglas en inglés).** Para el diseño del HPF, se consultó la tabla 1, y se eligió el modo de operación 6a, debido al bajo número de componentes externos requeridos. Al igual que para los BPF, se determinó  $Q = 1$  y una ganancia máxima de 20 dB (HOLP=10). Dado que la frecuencia de corte del filtro está determinada por la ecuación:  $f_0 = (R2 * f_{clk}) / (100R3)$ , se determinó  $R2 = R3$  para que únicamente dependiera de  $f_{clk}$ , y al igual que en los BPF, el circuito encargado de dicha variación es un circuito en modo estable basado en el circuito integrado MC1455P1G. El intervalo teórico para el HPF de frecuencias  $f_0$  se muestra en la tabla 3.

- **Filtro Supresor de Banda (Notch, por su nombre en inglés).** Para el diseño del filtro Notch, se consultó la tabla 1, y se determinó el modo de operación 2, el circuito es el mismo utilizado para los BPF, pero la salida se toma en el pin 2 del circuito integrado MF5CN. El intervalo teórico de frecuencias  $f_0$  de este filtro se muestra en la tabla 3.

La salida de cada filtro se conecta al amplificador operacional del mismo circuito integrado CI MF5CN, conectado como amplificador de ganancia unitaria para acoplar impedancias para la siguiente etapa. De ahí, cada filtro se conecta a un sumador ponderado, donde la ponderación se controla a través de un potenciómetro digital.

### **Circuito de control y módulo de recepción Bluetooth**

Con el fin de controlar la frecuencia de corte  $f_0$  de cada filtro, se diseñó un circuito con base al circuito integrado MC1455P1G, dicho circuito varía su frecuencia de acuerdo con el valor de sus componentes RA, RB y C. Para lograr dicha variación se determinó variar RB mediante el circuito integrado X9C103P, que es un potenciómetro digital de 10 k $\Omega$ . Para configurar cada X9C103P, las señales de control para el ajuste de la terminal variable provienen del microcontrolador PIC16F628A, debido a que dicho microcontrolador consta de una interfase USART, necesaria para la comunicación serial, en este caso vía Bluetooth. De los 16 pines configurables de entrada/salida, solo se necesitan 11 para el control de todos los potenciómetros; uno de ellos para asignar si el contador se incrementa o decrementa, y los otros 10 para los cambios de cada potenciómetro. Como módulo de recepción Bluetooth, se escogió el HC-06 debido a su bajo costo y que su configuración es automática, basta con conectarlo a la interfase USART del microcontrolador y está en capacidad para transmitir/recibir datos de forma serial a 9600 baudios.

### **Programación del microcontrolador [Microchip, 2017]**

El PIC16F628A es el encargado de configurar cada uno de los potenciómetros digitales, de acuerdo con las señales recibidas vía Bluetooth desde la aplicación



para Android. Su programación consiste en asignar a cada potenciómetro digital la señal de control (U/D) y la señal INC, que consiste en una señal de reloj que determina el número de pasos para cada potenciómetro.

El código fuente se realizó en lenguaje ensamblador y consistió de las siguientes etapas:

- **Configuración de la interfase USART.** Consistió en configurar los pines RB1 y RB2 como entradas, los cuales son recepción (Rx) y transmisión (Tx), posteriormente se configuraron los registros TXSTA y RCSTA para habilitar la transmisión y recepción en modo UART (asíncrono) y por último, la velocidad de transmisión; debido a que el módulo Bluetooth transmite de forma predeterminada a 9600 baudios, se eligió dicha velocidad para no reconfigurar el módulo HC-06.
- **Configuración de los puertos de entrada/salida.** A pesar de contar con 16 pines configurables de entrada/salida, después de configurar la interfase USART únicamente quedan disponibles 12 pines como salida, ya que RA4 y RA5 no son aptos para ser configurados como salidas. En la tabla 4 se muestra la asignación de las entradas y salidas de los puertos A y B del microcontrolador.

Tabla 4 Asignación de entradas y salidas del PIC16F628A.

PORTA		PORTB	
RA0	Ganancia BPF 1	RB0	
RA1	Ganancia BPF 2	RB1	Recepción USART
RA2	Ganancia BPF 3	RB2	Transmisión USART
RA3	Ganancia LPF	RB3	Frecuencia BPF 1
RA4		RB4	Frecuencia BPF 2
RA5		RB5	Frecuencia BPF 3
RA6	Ganancia Notch	RB6	Frecuencia LPF
RA7	Control (U/D)	RB7	Frecuencia Notch

### **Programación para seleccionar de que filtro se trata**

Primero se determinó el tipo de dato recibido vía aplicación para Android, por ser más sencillo de programar y menos susceptible a errores, se usó un carácter codificado ASCII, que corresponde a un número binario de 8 bits. La recepción de los primeros 4 bits determina el tipo de filtro, y los otros 4 si se trata de frecuencia o

ganancia y el número de pasos. La codificación para los bits recibidos se muestra en la tabla 5.

Tabla 5 Codificación de los bits recibidos por el microcontrolador.

Bits recibidos		Descripción
nible alto	nible bajo	
0010	xxxx	BPF 1
0011	xxxx	BPF 2
0100	xxxx	BPF 3
0101	xxxx	LPF
0110	xxxx	Notch
xxxx	0000	frecuencia, 0 pasos
xxxx	0001	frecuencia, 13 pasos
xxxx	0010	frecuencia, 25 pasos
xxxx	0011	frecuencia, 38 pasos
xxxx	0100	frecuencia, 50 pasos
xxxx	0101	frecuencia, 70 pasos
xxxx	0110	frecuencia, 85 pasos
xxxx	0111	frecuencia, 100 pasos
xxxx	1000	ganancia, 0 pasos
xxxx	1001	ganancia, 13 pasos
xxxx	1010	ganancia, 25 pasos
xxxx	1011	ganancia, 38 pasos
xxxx	1100	ganancia, 50 pasos
xxxx	1101	ganancia, 70 pasos
xxxx	1110	ganancia, 85 pasos
xxxx	1111	ganancia, 100 pasos

### **Programación de las rutinas de control**

Las rutinas de control son:

- *Recuperación del dato recibido.* Una vez recibido un dato vía Bluetooth, dicho dato es recuperado del registro "RCREG", y es copiado al registro dato (29H), para su uso posterior.
- *Llevar cada potenciómetro a 0 pasos (resistencia máxima).* Cuando ya se conoce el dato recibido, todos los potenciómetros digitales son llevados a 0 pasos, para posteriormente llevar cada uno al número de pasos correspondiente de acuerdo con el dato recibido.
- *Llevar cada potenciómetro al número de pasos recibido.* Una vez que se tienen todos los potenciómetros digitales en 0 pasos; de acuerdo al dato recibido se selecciona cual potenciómetro es el que hay que modificar y se activa un contador para llevarlo al número de pasos correspondiente.

## **Programación de la aplicación móvil**

Para crear la aplicación de control del proyecto, se utilizó la plataforma de desarrollo MIT App Inventor [AppInventor, 2017]. La aplicación desarrollada consta de 4 partes fundamentales: (1) conexión con dispositivo vía Bluetooth, (2) control remoto de la frecuencia y ganancia de los filtros, (3) base de datos con configuraciones guardadas por el usuario, y (4) configuraciones preestablecidas de micrófonos populares. Para lograr un manejo intuitivo de la aplicación y cumplir con las 4 partes fundamentales, el entorno gráfico de la aplicación consta de 10 pantallas diferentes, cuya distribución se observa en la tabla 6.

Tabla 6 Pantallas de la aplicación para dispositivo móvil basado en Android.

<b>Screen</b>	<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>
1	Conexión	presentación y conexión con el dispositivo Bluetooth
2	menu	muestra las opciones de control para el proyecto
3	nuevo	realiza el control de la frecuencia y ganancia de los filtros del proyecto, además permite guardar la configuración creada
4	biblioteca	contiene las configuraciones guardadas por el usuario (máximo 10)
5	presets	ingresa a una lista de los presets disponibles
6	SM58	contiene la configuración para emular la respuesta de dicho micrófono
7	BETA58	contiene la configuración para emular la respuesta de dicho micrófono
8	SM57	contiene la configuración para emular la respuesta de dicho micrófono
9	SM87	contiene la configuración para emular la respuesta de dicho micrófono
10	E835	contiene la configuración para emular la respuesta de dicho micrófono

## **Construcción de la fuente de alimentación**

En un principio se pensó la posibilidad de incluir todo el circuito dentro del mismo cuerpo del micrófono y alimentarlo por medio del phantom power, suministrado por equipos profesionales de audio a través del mismo cable del micrófono. Pero al investigar más al respecto, en el estándar internacional IEC 60268-15<sup>1</sup>, se definen 3 tipos de alimentación (P48, P24 y P9) que suministran una corriente máxima de 15 mA, por lo que resulta insuficiente para alimentar el circuito diseñado. Debido a esa razón fue necesario construir una fuente externa capaz de suministrar la corriente y el voltaje necesarios para el correcto funcionamiento del circuito.

---

<sup>1</sup> “sound system equipment - part 15: preferred matching values for the interconnection of sound system components”

## Construcción de los circuitos eléctricos

Una vez que se contó con el diseño de los filtros y los elementos requeridos para su construcción, se procedió al armado en la tablilla de pruebas (protoboard), después de comprobar su correcto funcionamiento (mostrado en la sección de resultados), se realizó el diseño y construcción del circuito impreso PCB (Printed Circuit Board). Se decidió realizar 3 circuitos:

- *Circuito de filtros:* contiene los 5 filtros. figura 2.

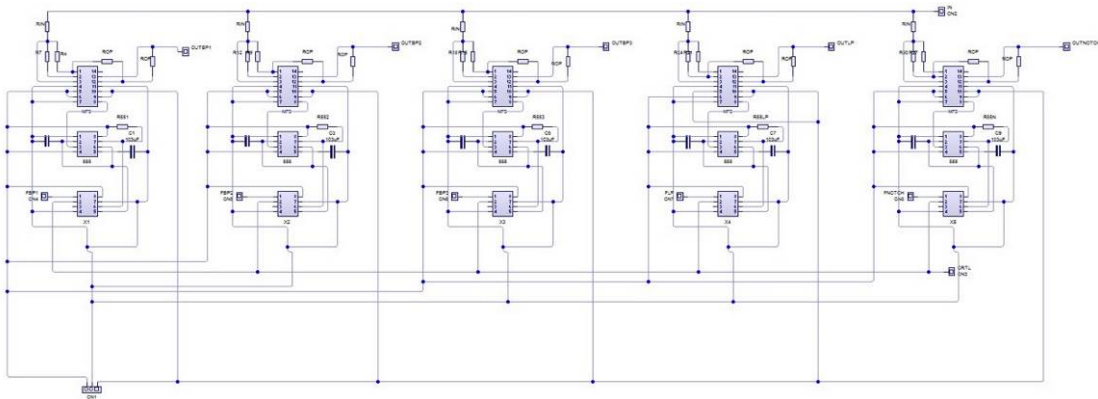


Figura 2 Diagrama de conexiones de la placa de filtros.

- *Circuito de control:* contiene el circuito de control (microcontrolador y módulo Bluetooth), el circuito sumador, el amplificador de entrada y el amplificador de salida figura 3.

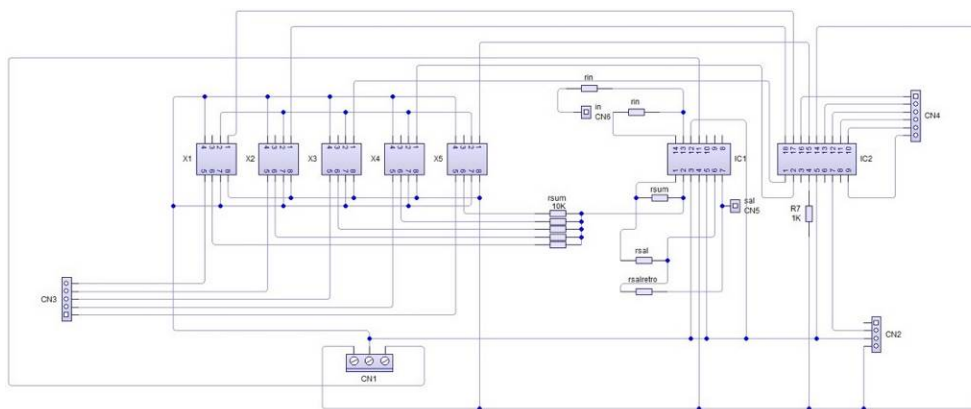


Figura 3 Diagrama de conexiones de la placa de control.

- **Circuito de fuente:** contiene la fuente de alimentación. A la salida de dispositivo se utilizó el transformador del micrófono Shure PG81, para acoplar impedancias y crear una salida balanceada. Una vez teniendo los circuitos terminados se procedió a armar el dispositivo final, siendo contenido en una caja de madera; el montaje final se observa en las figuras 4a y 4b.



a) circuitos.

b) caja de madera.

c) Altavoz y micrófono de medición.

Figura 4 Armado del dispositivo final.

### 3. Resultados

Una vez llevado a cabo el análisis, diseño y construcción de todo el sistema propuesto, se procedió a realizar pruebas y resultados finales. Primero, se probó el óptimo funcionamiento de los filtros, para ello se realizó lo siguiente:

- Se conectó a la entrada una señal de prueba proveniente de un generador de funciones con un voltaje pico-pico de 400 mV.
- Se configuraron los potenciómetros digitales a 0 pasos.
- Se realizó un barrido de frecuencias desde 10 hasta 30000 Hz.
- Se midió la salida de cada uno de los filtros, reportando el voltaje pico-pico medido en el osciloscopio.
- Se repitió el experimento para una configuración en los potenciómetros digitales de 25, 50, 75 y 100 pasos.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento, para cada tipo de filtros, pasabaja, pasalta y Notch, se obtuvieron las respuestas en frecuencia mostradas en las gráficas de figura 5.

Con las respuestas en frecuencia obtenidas, se definieron los valores para configurar la aplicación para dispositivo móvil basado en android. La otra prueba

que se hizo con el dispositivo fue para obtener los valores pre-establecidos, para ello se realizó lo siguiente:

- Se colocó un altavoz Alto TS115A a 1 m de altura a partir de su base.
- A un metro de distancia del centro del altavoz, se posicionó en *axis* el micrófono de medición mm1 de Beyerdynamic, véase la figura 4c.
- Se conectó el micrófono al software de medición Smart v7, por medio de la interfase usb de la mezcladora Behringer xr18.
- Se insertó ruido rosa al altavoz por medio de la mezcladora Behringer xr18, y se ecualizó la salida de la misma hacia el altavoz, tal que el micrófono obtuviera una medición lo más plana posible, figura 6a.
- Se sustituyó el micrófono de medición por un Shure SM58, y se registró su respuesta en frecuencia por medio de la medición obtenida.

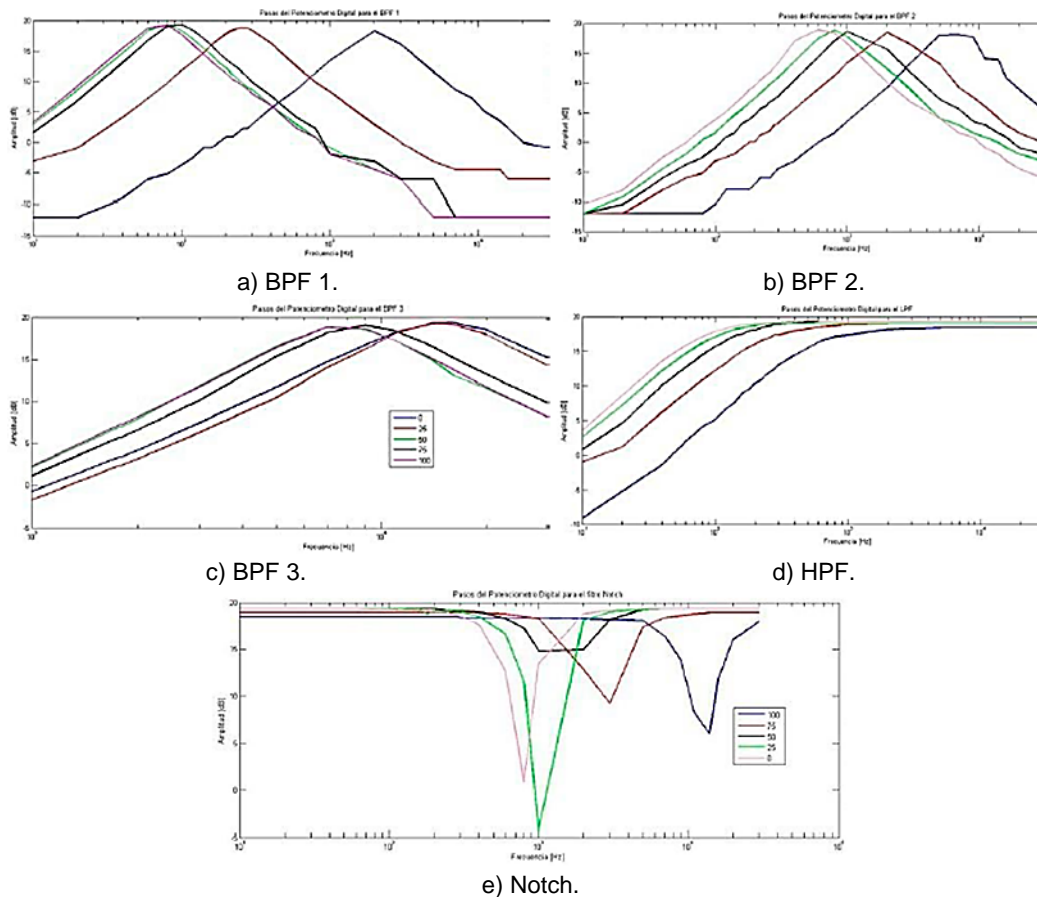


Figura 5 Respuesta en frecuencia de los filtros.

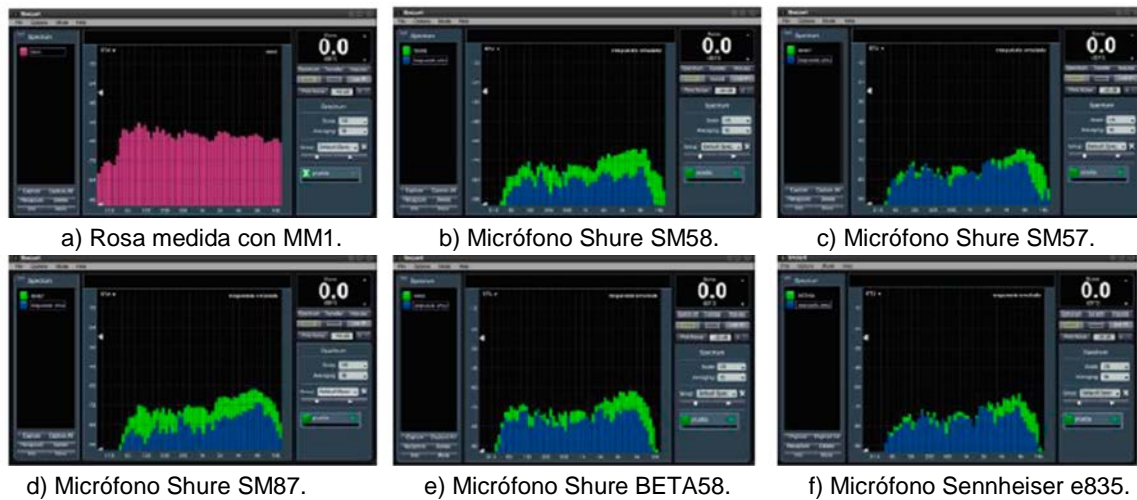


Figura 6 Respuesta en frecuencia del ruido.

- Se sustituyó el micrófono Shure SM58 por un Shure PG81, conectado al dispositivo construido y se variaron los parámetros de los filtros por medio de la aplicación para dispositivo móvil, hasta encontrar una configuración que se asemejara a la respuesta en frecuencia del Shure SM58 (figura 6b). Dicha configuración se guardó como el valor preestablecido SM58 en la aplicación para dispositivo móvil.
- Se repitieron los pasos 5 y 6, sustituyendo los micrófonos Shure SM57 (figura 6c), SM87A (figura 6d), beta58A (figura 6e) y Sennheiser e835 (figura 6f), para obtener la configuración de los valores preestablecidos correspondientes.

#### 4. Discusión

De acuerdo con la figura 6, se puede observar tanto la respuesta teórica, como la respuesta medida. Como se puede apreciar en dicha figura, vemos que las respuestas se aproximan, pero no es posible igualarla a la original debido a varias razones: (i) El factor de calidad ( $Q$ ) de cada filtro es fijo, por lo que su ancho de banda no se puede modificar; (ii) el nivel a la salida es diferente, debido a la sensibilidad del micrófono y del dispositivo construido; (iii) cada uno de los filtros no tienen un ajuste fino para su frecuencia de corte o frecuencia central, únicamente tienen 8 posiciones.

Al realizar la prueba final en las 4 primeras posiciones de cada filtro, el cambio es mínimo, por lo que el ajuste en algunas ocasiones pasaba desapercibido, lo que dificultó el ajuste de cada uno de los valores preestablecidos. A pesar de que la respuesta en frecuencia del micrófono original y el emulado son muy parecidas al ser medidas con ruido rosa; al compararlos en un uso vocal, las diferencias son más notables, esto es debido a factores propios de cada micrófono, como lo son la sensibilidad, el efecto de proximidad y el patrón de captación.

Con respecto a la aplicación para dispositivo móvil, ésta presenta un manejo intuitivo y claro, lo que resulta en un manejo sencillo para los usuarios. Contiene una biblioteca con 10 posiciones para guardar configuraciones creadas por el usuario y 5 valores pre-establecidos, que pueden ser utilizados para configurar el dispositivo de forma rápida y sencilla. La modificación de cada uno de los filtros no se realiza en tiempo real, una vez configurados todos los filtros, se envían los parámetros al dispositivo y se modifica cada filtro, esto toma alrededor de 200 milisegundos en total. El dispositivo final cumple ampliamente con su propósito, pero al recibir los parámetros vía Bluetooth, genera un ruido de gran intensidad a la salida del dispositivo, por lo que el ajuste de los parámetros debe realizarse con el canal del micrófono silenciado o desconectado.

## **5. Conclusiones**

En el presente trabajo se ha analizado, diseñado y construido un micrófono vocal con respuesta en frecuencia adaptable. Se diseñaron e implementaron los filtros tanto pasabanda, pasaltas y Notch, así como se construyeron los diferentes circuitos impresos. Con respecto al control de los parámetros de los filtros, se generó una aplicación para dispositivo móvil basado en Android. Con la aplicación se puede configurar los filtros en dos esquemas:

- Respuestas en frecuencia preestablecidas.
- Respuesta en frecuencia configurada por el usuario.

Determinando la respuesta en frecuencia de cada uno de los filtros asociados.



Adicionalmente, debido a que el dispositivo construido es independiente del micrófono, el resultado final dependerá del micrófono a usar y de la respuesta en frecuencia de éste.

Finalmente, algunas de las limitaciones que se identificaron en el funcionamiento del son:

- Un ruido provocado al recibir los parámetros del módulo de recepción Bluetooth.
- Tener disponibles más posiciones para cada filtro, con el fin de realizar ajustes más finos, y así como.
- Reducir el tamaño del dispositivo final, para poder integrarlo en el cuerpo del micrófono.

Algunos aspectos para mejorar para futuros proyectos sería crear una versión digital, donde no solo el control sea digital, sino todo el procesamiento de la señal; así como incluir efectos como reverberación y retardo, para ampliar el posible uso del dispositivo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alton Everest F. and Pohlmann K. C., *Master Handbook of Acoustics*. McGraw-Hill, 6 ed, 2015.
- [2] Davis F. G., R. Jones *Sound Reinforcement Handbook*. Milwaukee: Hal Leonard Corporation, 2nd, 1989.
- [3] Microchip, PIC16F628 <http://web.mit.edu/6.115/www/document/16f628.pdf>.
- [4] National Semiconductor, MF5CM <http://www.agspecinfo.com/pdfs/M/MF5CM.PDF>.
- [5] ON Semiconductor, MC1455 <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC1455-D.PDF>.
- [6] Prandoni P, Vetterli M., *Signal Processing for Communications*. EPFL Press, 1st ed., 2008.
- [7] Shure América Latina-2, *Publications*: <http://cdn.Shure.com/publication/upload/399/audio-systems-guide-for-houses-of-worship.pdf>.

- [8] App Inventor <http://appinventor.mit.edu/explore/about-us.html>.
- [9] Shure América Latina-3, Publications <http://cdn.Shure.com/publication/upload/398/audio-systems-guide-for-meetings-and-conferences.pdf>.
- [10] Shure América Latina-1, Publications [http://cdn.Shure.com/publication/upload/394/us\\_pro\\_al1532\\_theater\\_guide\\_ea.pdf](http://cdn.Shure.com/publication/upload/394/us_pro_al1532_theater_guide_ea.pdf).
- [11] Shure América Latina - 4, Publications [http://cdn.Shure.com/publication/upload/401/us\\_pro\\_audiomusiceducators\\_ea.pdf](http://cdn.Shure.com/publication/upload/401/us_pro_audiomusiceducators_ea.pdf).
- [12] Shure América Latina, PGA81 <https://es.shure.com/productos/microfonos/pg-alta/microfono-de-condensador-cardioide-para-instrumentos-pga81>.
- [13] Texas Instruments TL084, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl084.pdf>.
- [14] Xicor, X9C103 <http://www.agspecinfo.com/pdfs/X/X9C103~1.PDF>.

# **IMPACTO DEL DESEQUILIBRIO DE CLASES EN EL ENTRENAMIENTO DE REDES NEURONALES CONVOLUCIONALES EN PROBLEMAS MULTI-CLASE**

*IMPACT OF CLASS IMBALANCE IN THE TRAINING OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR MULTI-CLASS PROBLEMS*

**Andrés Ferreira Ramírez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*fra@correo.azc.uam.mx*

**Eduardo Rodríguez Martínez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*erm@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

El problema del desequilibrio de clases en el aprendizaje automático, se presenta cuando el conjunto de entrenamiento subyacente está compuesto por un número desigual de muestras para cada clase, lo que ocasiona que datos de algunas clases dominen claramente. Aparentemente, la mayoría de los modelos clasificadores aprenden a clasificar dichos conjuntos de datos; sin embargo, presentan un rendimiento de generalización deficiente debido a un fuerte sesgo hacia las clases mayoritarias. En este artículo, se presenta un estudio sistemático dirigido a comprender como afecta el problema del desequilibrio de clases al rendimiento de una red neuronal convolucional entrenada para una tarea de clasificación de imágenes, y se presenta una metodología para corregir el sobreentrenamiento e incrementar la generalización de la red.

**Palabras Claves:** Aumento de datos, desequilibrio de clases, red neuronal convolucional, sobreentrenamiento.

## **Abstract**

*The class imbalance problem in machine learning occurs when the underlying training set is composed of unequal number of samples for each class, which causes*

*data from some classes to clearly dominate. Apparently, most classifiers learn to classify such datasets, however, they show poor generalization performance due to a strong bias towards the majority classes. This article presents a systematic study aimed at understanding how the class imbalance problem affects the performance of a convolutional neural network which has been trained for an image classification task. Also, we present a methodology to correct the overtraining and increase the generalization performance of the network.*

**Keywords:** Data augmentation, class imbalance, convolutional neural network, overfit.

## **1. Introducción**

La clasificación de imágenes es el proceso de asignar a una imagen una o múltiples etiquetas que describan su contenido. Para realizar la clasificación, se debe de diseñar un modelo que sea capaz de aprender las etiquetas que tiene que asignar a una imagen determinada; la asignación se realiza mediante un proceso de aprendizaje que utiliza un conjunto de imágenes de entrenamiento previamente etiquetadas, el cual debe de ser lo suficientemente grande para garantizar un entrenamiento eficiente.

En las últimas décadas, la clasificación de imágenes ha sido una de las áreas más estudiadas en el campo del aprendizaje automático, debido principalmente a su aplicación en problemas reales. Se han investigado muchos enfoques para encontrar soluciones óptimas en los problemas de clasificación, sin embargo, las bases de datos con grandes cantidades de imágenes y el aumento en la capacidad de procesamiento de las GPUs han hecho de las redes neuronales convolucionales (CNNs, por sus siglas en inglés) la mejor elección, ya que superan en rendimiento a los algoritmos tradicionales.

Actualmente, existen una gran variedad de bases de datos de imágenes etiquetadas, disponibles al público, que son utilizadas para desarrollar y comparar modelos de clasificación con CNN. Algunos de estos conjuntos de referencia contienen la misma cantidad de imágenes por clase y se conocen como conjuntos de datos equilibrados; sin embargo, la mayoría de estos contienen un número

desigual de imágenes y se conocen como conjuntos de datos desequilibrados. Tratar con desequilibrio de clases es un gran desafío ya que en estos conjuntos, los ejemplos de unas clases superan significativamente a los ejemplos de otras clases; además las clases minoritarias son las de mayor interés –desde el punto de vista del aprendizaje- ya que representan casos raros o por que la adquisición de datos de estos ejemplos es costosa.

En [Hensman and Masko, 2015] y [Pulgar, 2017] se establece que el desequilibrio de clases puede tener un efecto perjudicial significativo en el entrenamiento de los clasificadores basados en CNN. Para aliviar dicho efecto, en los últimos tres años han surgido diversas propuestas que adaptan las técnicas tradicionales para combatir el desequilibrio en los datos en el marco del aprendizaje profundo. Dichas técnicas se dividen en tres grupos: (a) muestreo a nivel de datos, en donde se modifica el conjunto de entrenamiento para disminuir los ejemplos de la clase mayoritaria [Huang, 2016] [Song, 2017] [Dong, 2018], o aumentar los ejemplos de la clase minoritaria [Ando, 2017]; (b) modificación a nivel algorítmico, cuyo objetivo es modificar el algoritmo de aprendizaje profundo a nivel de función objetivo [Huang, 2016] [Sze-To, 2017] [Dong, 2017]; y (c) sensibles a los costos, cuyo objetivo es penalizar en mayor grado los errores cometidos en las clases minoritarias [Wang et al., 2016] [Khan, 2018]. El enfoque más sencillo en las soluciones de muestreo a nivel de datos centrados en la clase mayoritaria consiste en eliminar aleatoriamente ejemplos de esta, sin embargo, existen técnicas que seleccionan los ejemplos a ser eliminados de forma que se minimice la pérdida de información [Song, 2017]. En el caso del muestreo centrado en la clase minoritaria, el enfoque más sencillo radica en duplicar ejemplos aleatoriamente, sin embargo, existen soluciones más inteligentes que generan ejemplos sintéticos nuevos mediante la interpolación entre ejemplos positivos preexistentes que se encuentran muy juntos (SMOTE) [Chawla, 2002] y soluciones en donde se sintetizan ejemplos buscando no alterar la distribución de las clases [Ando, 2017].

No obstante que las técnicas de muestreo aleatorio son fáciles de implementar y disminuyen considerablemente el nivel de desequilibrio, estas pueden dar lugar a un sobreajuste del modelo de clasificación. En el caso de las técnicas inteligentes

de generación o eliminación de ejemplos, estas son generalmente complejas y computacionalmente caras [He, 2009].

En este trabajo, se presenta un estudio sistemático para analizar el impacto del desequilibrio de clases en el rendimiento de clasificación de una CNN. Para el análisis se generan bases de datos con diferentes relaciones de desequilibrio utilizando un método de sub-muestreo que elimina muestras aleatorias de las clases minoritarias. Además, se presenta una metodología consistente en la aplicación de una serie de técnicas y algoritmos del estado del arte en un orden propuesto para corregir el sobreentrenamiento causado por el muestreo aleatorio e incrementar la generalización de la red.

## **2. Métodos**

En esta sección se proporcionan los detalles del método implementado para el desequilibrio de clases, se describe el algoritmo de aprendizaje seleccionado para este estudio y sus parámetros de entrenamiento, se describe el fenómeno de sobreajuste y el proceso de regularización para evitarlo, finalmente se describen los experimentos realizados.

### **Desequilibrio de clases**

El desequilibrio de clases puede tomar muchas formas, en particular en el contexto de clasificación multi-clase, típico en CNN. En [Buda, 2017] se define el desequilibrio por pasos, en el cual el número de ejemplos es igual dentro de las clases mayoritarias y minoritarias, pero difiere entre las clases mayoritarias y minoritarias. Este tipo de desequilibrio se caracteriza por dos parámetros: la fracción de las clases minoritarias definidas en la ecuación 1 y la relación de desequilibrio ( $IR$ ) entre el número de ejemplos en las clases mayoritarias y el número de ejemplos en las clases minoritarias definidas en la ecuación 2.

$$\mu = \frac{\{i \in \{1, \dots, N\} : C_i \text{ es minoritario}\}}{N} \quad (1)$$

$$\rho = \frac{\max_i\{|C_i|\}}{\min_i\{|C_i|\}} \quad (2)$$

donde  $C_i$  es un conjunto de ejemplos en la clase  $i$  y  $N$  es el número total de clases. En este trabajo, se usa el conjunto de datos Caltec101 [Caltech101, 2018], que consta de 9,144 imágenes a color de alta resolución pertenecientes a 103 categorías. Cada categoría contiene de 31 a 800 imágenes y la mayoría de las categorías tienen alrededor de 50 imágenes. El tamaño de cada imagen es de aproximadamente 300 x 200 píxeles. Se seleccionaron las 5 clases más pequeñas (clases minoritarias) y las 5 clase más grandes (clases mayoritarias), para formar un subconjunto con 1973 imágenes. El subconjunto fue dividido en 4 conjuntos con desequilibrio de clases, utilizando el parámetro  $\mu = 0.5$ , y diferentes relaciones de  $\rho$  (1:1, 3:1, 7:1, 15:1) para implementar el desequilibrio por pasos. Para la relación 1:1 se estandariza el número de imágenes por clase, a la clase con el menor número de imágenes, para formar un conjunto de 320 imágenes; este es el conjunto base para la formación de las diferentes relaciones de desequilibrio. Para la relación 3:1, se eliminan 16 imágenes de cada una de las clases minoritarias y se agregan 16 imágenes a cada una de las clases mayoritarias. Para la relación 7:1, se eliminan y se agregan 8 de las 16 imágenes restantes a las clases minoritarias y mayoritarias respectivamente; para la relación 15:1 se siguió el mismo procedimiento, ver la tabla 1 para más detalles. La estandarización, eliminación y el agregado de imágenes se realizó de manera aleatoria.

Tabla 1 Resumen de los conjuntos con desequilibrio de imágenes.

Clase	Num. De imágenes x clase	Relación de desequilibrio			
		1:1	3:1	7:1	15:1
Aviones	800	32	48	56	60
Caras	435	32	48	56	60
Reloj	239	32	48	56	60
Leopardos	200	32	48	56	60
Bonsai	128	32	48	56	60
Lirio de agua	37	32	16	8	4
Fresa	35	32	16	8	4
Gato montés	34	32	16	8	4
Binocular	33	32	16	8	4
Metronomo	32	32	16	8	4
<b>Totales</b>	<b>1973</b>	<b>320</b>	<b>320</b>	<b>320</b>	<b>320</b>

## Algoritmo de aprendizaje

Para la clasificación se utilizó una CNN que tiene una profundidad de 6 capas, 4 capas de convolución y 2 capas completamente conectadas. Las capas de convolución manejan de 32 a 512 filtros cuyo tamaño varía de 7x7 a 3x3. Una unidad de ReLu es aplicada a la salida de cada capa de convolución y capa completamente conectada. Una capa de pooling máximo es aplicada a la salida de cada capa de ReLu en cada capa de convolución. La salida de la segunda capa completamente conectada es alimentada a un Softmax que produce una distribución sobre las etiquetas de las  $N$  clases, tabla 2.

Tabla 2 CNN propuesta.

Capa	Tipo	Dimensión			Kernel	Paso	Relleno
		Ancho	Alto	Prof			
0	Input	227	227	3	-	-	-
1	Convolution_1	111	111	32	7	2	-
	ReLu_1	111	111	32	-	-	-
	Pooling max_1	55	55	32	3	2	-
2	Convolution_2	55	55	64	5	1	2
	ReLu_2	55	55	64	-	-	-
	Pooling max_2	27	27	64	3	2	-
3	Convolution_3	27	27	128	3	1	2
	ReLu_3	27	27	128	-	-	-
	Pooling max_3	13	13	128	3	2	-
4	Convolution_4	13	13	128	3	1	1
	ReLu_4	13	13	128	-	-	-
	Pooling max_4	6	6	128	-	-	-
5	Fully Connected_1	1	1	512	-	-	-
	ReLu_5	1	1	512	-	-	-
6	Fully Connected_2	1	1	NC	-	-	-
	Softmax	1	1	NC	-	-	-
	Clasificación	1	1	NC	-	-	-

La CNN fue entrenada utilizando descenso de gradiente estocástico con un tamaño de lote de 10, momento de 0.9 y una disminución de pesos (factor de regularización) de 0.0005. Los pesos iniciales en cada una de las capas fueron inicializados con una distribución gaussiana con una media de 0 y una desviación estándar de 0.01. Los umbrales de activación en cada una de las capas fueron inicializados a cero. El número de épocas de entrenamiento se fijó a 50. Se inició con una tasa de



aprendizaje de 0.001 la cual se disminuyó en un factor de 10 después de cada 10 épocas. La CNN fue entrenada en una GPU NVIDIA GeForce GTX 980M con 1536 núcleos y 4.3 GB de memoria, utilizando el Toolbox de redes neuronales de MatLab 2018a.

### **Sobreajuste**

Cuando se entrena una CNN, hay un compromiso entre la optimización (exactitud) y la generalización de la red. La optimización se refiere al proceso de ajuste de la red para obtener el mejor rendimiento posible con los datos de entrenamiento, mientras que la generalización se refiere a qué tan bien funciona la red entrenada con datos que nunca ha visto. En aprendizaje automático, el sobreajuste es definido como el efecto de sobreentrenar un algoritmo de aprendizaje con los datos utilizados para el entrenamiento. Durante el sobreajuste, la optimización se incrementa mientras la generalización de la red empeora, lo que indica, que la red quedó ajustada a características muy específicas de los datos de entrenamiento.

El proceso para luchar contra el sobreajuste de una CNN se conoce como regularización e incluye técnicas como:

- **Reducir el tamaño de la red:** El número de capas y el número de unidades por capa determinan el número de parámetros que se puede aprender la CNN, lo que se conoce como la capacidad del modelo. Un modelo con más parámetros tiene más capacidad de memorización y puede aprender fácilmente un mapeo perfecto entre las muestras de entrenamiento y sus objetivos, pero sin ningún poder de generalización; sin embargo, un modelo con menos parámetros y menos capacidad de memorización puede no aprender el mapeo tan fácilmente. Para encontrar el tamaño de la red apropiado para los datos, se deben de evaluar diferentes arquitecturas, comenzando con pocas capas y parámetros, y aumentando el tamaño de las capas o agregando capas nuevas a la red hasta encontrar rendimientos decrecientes con respecto a la pérdida de validación. Aunque reducir el tamaño de la red es la forma más sencilla de evitar el sobreajuste, las redes

grandes tienen el potencial de ser más poderosas que las redes pequeñas, por lo que esta es una opción que se adopta muy pocas veces.

- **Regularización de pesos:** Cuando se tiene una arquitectura de red fija y un conjunto de datos de entrenamiento fijos, pueden existir múltiples conjuntos de valores de pesos (modelos múltiples) que podrían describir los datos. Un modelo con pesos pequeños es más simple que un modelo con pesos grandes y tiene menos posibilidades de sobreajuste, bajo esta suposición implícita, una forma común de mitigar el sobreajuste es poner restricciones a la complejidad de la red al obligar a sus pesos a tomar valores pequeños, lo que hace que la distribución de los valores de los pesos sea más regular. Esto se llama regularización de pesos, y se hace agregando a la función de pérdida de la red una penalización por tener pesos grandes durante el entrenamiento. Una de las técnicas de regularización de pesos más utilizada en el contexto de las redes neuronales es la disminución de pesos (weight decay) o regularización  $L_2$ , en donde la penalización agregada es proporcional al cuadrado del valor del coeficiente de pesos. Efectivamente, esta regularización fomenta distribuciones de pesos pequeños y dispersos sobre grandes valores concentrados en solo unas pocas neuronas.
- **Dropout:** Es una técnica en la cual las salidas de algunas neuronas, seleccionadas aleatoriamente, se fijan a cero para que no contribuyan en el paso hacia adelante y no participen en la propagación hacia atrás del algoritmo de entrenamiento; lo que reduce coadaptaciones complejas de las neuronas, generadas en el aprendizaje estándar de retropropagación en redes neuronales. Las neuronas seleccionadas junto con sus conexiones entrantes y salientes, son marginadas de manera temporal, lo que equivale a muestrear una red “reducida” de la red original; la cual está formada con las  $n$  neuronas que sobrevivieron al marginado o aislamiento. La red con  $n$  unidades puede verse como una colección de  $2^n$  posibles redes neuronales reducidas, que comparten pesos de modo que la cantidad total de parámetros es menor. De esta manera, cada vez que se presenta un ejemplo de entrenamiento, la red neuronal muestrea y entrena una arquitectura

diferente. Durante el entrenamiento de la red, cada neurona se activa con una probabilidad fija (por lo general, 0.5 o se establece con un conjunto de validación). Este muestreo aleatorio de una subred dentro de la red de escala completa introduce un efecto de conjunto durante la fase de prueba, donde se usa la red completa para realizar la predicción. La técnica de Dropout o marginado [Srivastava, 2014], es uno de los enfoques más populares para la regularización de redes neuronales.

- **Aumento de datos:** El entrenamiento de una CNN con una gran cantidad de datos, es la clave para incrementar la generalización de la red. Sin embargo, en la práctica, la cantidad de datos que se tienen es limitada, lo que puede impedir el buen desarrollo del modelo. Para evitar este problema, es necesario crear datos falsos y agregarlos al conjunto de entrenamiento, técnica conocida como aumento de datos. Los enfoques más simples para aumentar los datos incluyen agregar ruido y aplicar transformaciones aleatorias a los datos existentes. En clasificación de imágenes, se puede agregar ruido gaussiano y se pueden aplicar transformaciones (aleatorias) simples a las imágenes, que incluyen: voltear (horizontal y verticalmente), rotación, escalar (el tamaño de la imagen), traslación (a lo largo de la dirección X o Y), etc. El aumento de datos puede aumentar el tamaño del conjunto de entrenamiento 10 veces o más, haciendo que el modelo sea más robusto (y evitar el sobreajuste).

## **Experimentos**

Para evaluar el rendimiento de la CNN, la red se entrenó desde cero con cada una de las relaciones de desequilibrio. Para las pruebas, cada base de datos fue dividida en conjunto de entrenamiento y prueba. El conjunto de entrenamiento fue formado con el 70% de las imágenes de la base de datos y el 30% restante se utilizó para formar el conjunto de prueba.

Para probar la corrección del sobreajuste de la CNN se realizaron tres pruebas. En la primera, se utilizó la CNN sin ningún tipo de regularización para observar el sobreajuste. En la segunda, se agregó a la CNN regularización de pesos, Dropout

y aumento de datos para ver su efecto en la reducción o eliminación del sobreajuste. Finalmente a la red implementada en la prueba dos, se le agregó normalización en diferentes capas con el fin de incrementar la generalización de la red. En estas pruebas, los parámetros para aumento de datos fueron: rango de rotación de -20 a 20 grados, reflexión aleatoria en la dirección izquierda-derecha, rango de traslación horizontal y vertical de -3 y 3 píxeles respectivamente. La tasa de regularización de pesos se fijó en 0.0005.

### 3. Resultados

#### Desequilibrio de clases

En la figura 1 se muestran los resultados del proceso de desequilibrio por pasos implementado con la CNN propuesta, se muestra las gráficas de exactitud para las fases de entrenamiento y prueba. En entrenamiento, la CNN llega a una exactitud del 100%, en todas las relaciones, en aproximadamente 20 épocas; sin embargo, en la fase de prueba obtiene exactitudes del 69% al 85%, lo que evidencia la falta de generalización de la red.

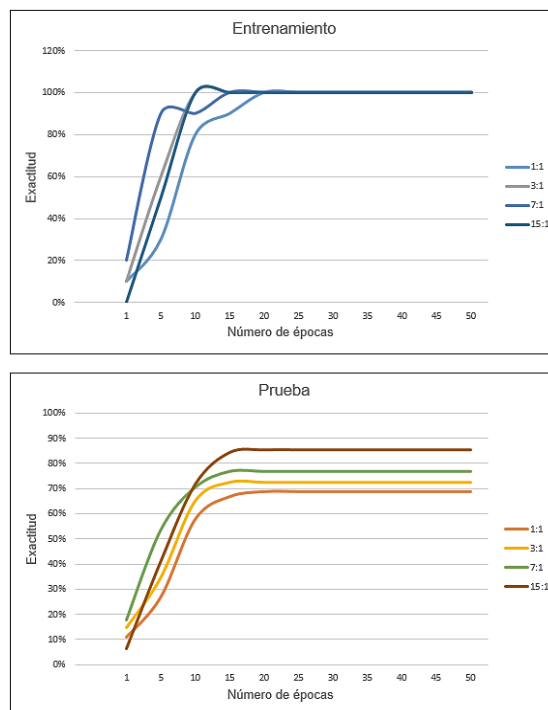


Figura 1 Gráficas de exactitud de la CNN entrenada en 50 épocas.

Note que, al incrementarse la relación de desequilibrio, la exactitud en prueba se incrementa; lo que podría suponer que la capacidad de generalización de la red mejora, pero no es así. En cada relación de desequilibrio, se incrementa el número de imágenes de las clases mayoritarias y se disminuye el de las clases minoritarias; esto causa que la red tienda a memorizar bien las clases mayoritarias y que vaya olvidando las minoritarias conforme la relación se hace más grande.

Aunque en la figura 1 se da información general sobre la exactitud de la CNN, en la tabla 3 se presentan los rendimientos de recuperación a nivel de clases (exactitud y recuerdo), con el fin de obtener información separada para las clases minoritarias (en color azul) y mayoritarias. Se define exactitud como la cantidad de muestras reconocidas correctamente en la clase  $i$  (auténticos positivos, AP) entre la cantidad de muestras reconocidas como de la clase  $i$  (AP más errores de tipo 1), mientras que recuerdo se define como el número de AP dividido entre el número de muestras que debieron ser reconocidas como de la clase  $i$  (AP más errores de tipo 2).

Tabla 3 Comparación de rendimiento de clases (CNN).

Clase	1:1		3:1		7:1		15:1	
	Exac	Rec	Exac	Rec	Exac	Rec	Exac	Rec
Aviones	0.875	0.700	0.867	0.929	0.889	0.941	1.000	0.944
Caras	1.000	0.700	0.688	0.786	0.923	0.706	0.857	1.000
Reloj	0.556	1.000	0.889	0.571	0.750	0.706	0.867	0.722
Leopardos	0.529	0.900	0.813	0.929	0.750	0.882	0.875	0.778
Bonsai	1.000	0.300	0.857	0.857	0.727	0.941	0.762	0.889
Lirio de agua	0.556	0.500	0.500	0.600	0.000	0.000	0.500	1.000
Fresa	0.900	0.900	0.429	0.600	0.333	0.500	0.000	0.000
Gato montés	0.429	0.600	0.286	0.400	0.000	0.000	0.000	0.000
Binocular	1.000	0.600	0.667	0.400	0.000	0.000	0.500	1.000
Metrónomo	0.875	0.700	1.000	0.400	0.500	0.500	1.000	1.000

Por ejemplo, para la clase “Caras” (relación 1:1), los resultados de la tabla 3 indican que ninguna de las muestras pertenecientes a las otras clases fue reconocida como “Caras”, mientras que el recuerdo indica que algunas muestras que pertenecen a la clase “Caras” fueron erróneamente asignadas a otras clases. Presentar dichas

métricas tiene por objetivo mostrar en que clases es en las que los errores de tipo 1 y tipo 2 predominan. Se puede observar que hay una tendencia clara de incremento y disminución en la exactitud para las clases mayoritarias y minoritarias respectivamente.

### **Sobreajuste**

En la figura 2 se muestran las gráficas de error de entrenamiento y prueba obtenidas para la CNN después de 50 épocas de entrenamiento. En algunos puntos de estas gráficas se puede observar que, mientras el error de entrenamiento disminuye constantemente, el error de prueba se incrementa; lo que demuestra que el desequilibrio de clases genera una situación de sobreajuste de la CNN. Para las relaciones 1:1 y 3:1 el sobreajuste se produce en las épocas 16 y 13 respectivamente; mientras que para las relaciones 7:1 y 15:1, la red sufre un sobreajuste parcial en la época 17.

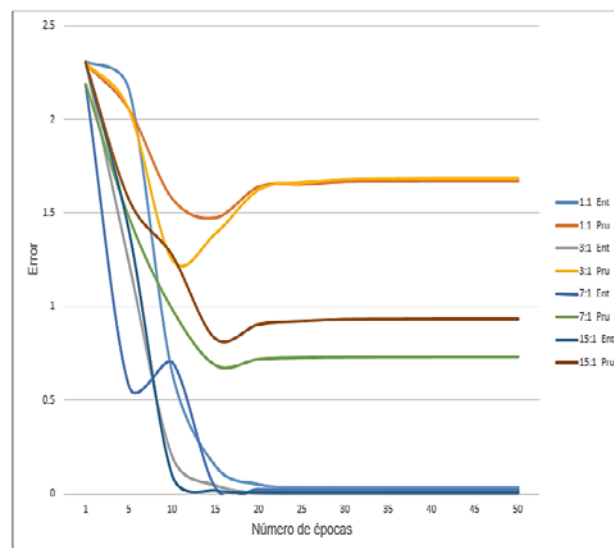


Figura 2 Error de entrenamiento (Ent) y prueba (Pru) del sobreajuste de la CNN.

En la figura 3, se muestran los resultados de las pruebas realizadas para corregir el sobreajuste de la red, se muestran las gráficas de exactitud y error para la fase de prueba. Se puede observar que la exactitud aumenta y el error disminuye cuando la CNN simple es regularizada con regularización de pesos, aumento de datos y

Dropout ( $RP + AD + Dropout$ ), y la exactitud mejora más cuando se agregan las capas de normalización a la CNN ( $RP + AD + Dropout + Normalización$ ).

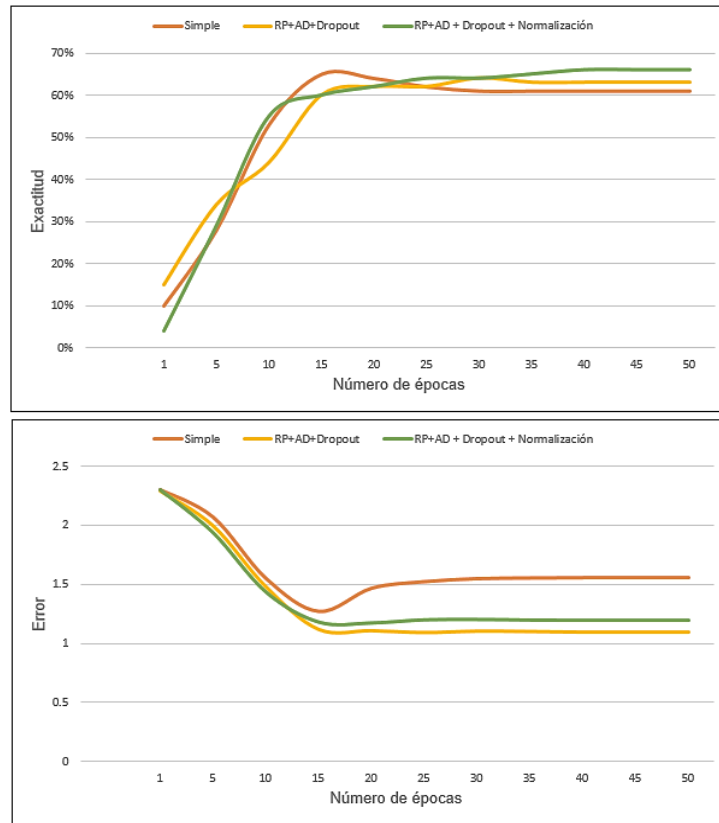


Figura 3 Resultados de corrección de sobreajuste de la CNN.

#### 4. Discusión

El desequilibrio de clases tiene un efecto perjudicial significativo en el entrenamiento de una CNN, afecta tanto la convergencia durante la fase de entrenamiento como la generalización de la red en el conjunto de prueba. La pérdida significativa de rendimiento se debe principalmente a la distribución asimétrica de clases, dada por la relación de desequilibrio. En este sentido, el uso de la medida de exactitud estándar, utilizada para guiar el proceso de aprendizaje de la CNN, puede estar proporcionando ventaja a la clasificación de las clases mayoritarias; además, las clases minoritarias, en la medida que se incrementa la relación de desequilibrio, pueden ser identificadas como ruido y, por lo tanto, pueden ser descartadas erróneamente por el clasificador.

El usar una relación de desequilibrio estática en la forma propuesta no equivale a transformar el problema de clasificación multi-clase en múltiples problemas de clasificación binaria, más bien, acentúa los casos de múltiples clases minoritarias y mayoritarias. Como se expone en [Wang, 2012], estos casos afectan negativamente el desempeño general del clasificador sobre las clases minoritarias. La razón por la que se utilizó una relación de desequilibrio estática es para trabajar en el peor de los casos que se pueden presentar en problemas desequilibrados multi-clase. Lo anterior nos indica que tenemos que ajustar adecuadamente la métrica, para medir el rendimiento del clasificador, a los objetivos perseguidos. Para aclarar esto, tomemos como ejemplo la relación 15:1 de nuestros experimentos, en donde las clases mayoritarias tienen 60 imágenes por clase y las minoritarias solo 4 imágenes. La clase aviones es el 18.75% del conjunto de 320 imágenes y la clase gato montés es el 1.25% del conjunto, pero estamos interesados en identificar gatos y no aviones. En este caso la red alcanzó una exactitud del 94.4% prediciendo la clase aviones y una exactitud de 0% prediciendo la clase gato montés, todo el tiempo; lo que genera un clasificador inútil para el objetivo planteado. En cambio, una métrica adecuadamente ajustada podría lograr una exactitud menor prediciendo aviones, pero tendría una tasa de recuperación sustancialmente mayor, que es realmente la medida para la que debería haberse optimizado.

## **5. Conclusiones**

Ya que muchas de las CNN empleadas para problemas de clasificación de imágenes utilizan conjuntos de entrenamiento desbalanceados, esto puede generar modelos de clasificación sub-óptimos; es decir, una buena cobertura de los ejemplos de las clases mayoritarias, mientras que los ejemplos de las clases minoritarias son con frecuencia clasificados erróneamente. Por lo tanto, esos algoritmos que obtienen un buen comportamiento en el marco de la clasificación con CNN, no necesariamente logran el mejor rendimiento para los conjuntos de datos desequilibrados.

El desequilibrio de clases provoca el sobreajuste de la CNN a los datos de entrenamiento, lo que afecta su capacidad de generalización. Las técnicas de



regularización de pesos, aumento de datos y dropout, funcionan correctamente para reducir el sobreentrenamiento de la CNN pero no ayudan a incrementar el rendimiento en prueba. Las capas de normalización integradas en la CNN, incrementan la exactitud en prueba en un 10%, es decir, mejoran la generalización de la CNN.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Ando, S., Huang, C., Deeper over-sampling framework for classifying imbalance data. In Proceedings of the Joint European Conference on Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases (ECML PKDD'17), 770-785, 2017.
- [2] Buda, M., Maki, A., Mazurowski, M., A systematic study of the class imbalance problem in convolutional neural networks. Computer Vision and Pattern Recognition, journal (CoRR), arXiv preprint arXiv:1710.05381, 2017.
- [3] Caltech101, Computational Vision at Caltech: [http://www.vision.caltech.edu/Image\\_Datasets/Caltech101/](http://www.vision.caltech.edu/Image_Datasets/Caltech101/).
- [4] Chawla, N., Bowyer, K., Kegelmeyer, W., SMOTE: Synthetic minority over-sampling technique. Journal of Artificial Intelligence Research, Vol. 16, 321-357, 2002.
- [5] Dong, Q., Gong, S., Zhu, X., Class rectification hard mining for imbalanced deep learning. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV'17), 1869-1878, 2017.
- [6] Dong, Q., Gong, S., Zhu, X., Imbalanced deep learning by minority class incremental rectification. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Early Access, 2018.
- [7] He, H., Garcia, E., Learning from imbalanced data. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 21, Issue 9, 1263-1284, 2009.
- [8] Hensman, P., Masko, D., The impact of imbalanced training data for convolutional neural networks. Degree project, 2015.
- [9] Khan, S., Hayat, M., Bennamoun, M., Sohel, F., Tongeri, R., Cost-sensitive learning of deep feature representations from imbalanced data. IEEE

- Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 29, Issue 8, 3573-3587, 2018.
- [10] Huang, C., Li, Y., Loy, C., Tang, X., Learning deep representation for imbalanced classification. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'16), 5375-5384, 2016.
- [11] Pulgar, F., Rivera, A., Charte, F., del Jesus, M., On the impact of imbalanced data in convolutional neural networks performance. In Proceedings of the International Conference on Hybrid Artificial Intelligence Systems (HAIS'17), 220-232, 2017.
- [12] Song, J., Shen, Y., Jing, Y., Song, M., Towards deeper insights into deep learning from imbalanced data. In Proceedings of the Chinese Conference on Computer Vision (CCCV'17), 674-684, 2017.
- [13] Srivastava, N., Hilton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., Salakhutdinov, R., Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting. Journal of Machine Learning Research, Vol. 15, 1929-1958, 2014.
- [14] Sze-To, A., Wong, A., A weight-selection strategy on training deep neural networks for imbalanced classification. In Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Recognition (ICAR'2017), 3-10, 2017.
- [15] Wang, S., Liu, W., Wu, J., Cao, L., Meng, Q., Kennedy, P., Training deep neural networks on imbalanced data sets. In Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'16), 4368-4374, 2016.
- [16] Wang, S., Yao, X., Multiclass imbalance problems: Analysis and potential solutions. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, Vol. 42, Issue 4, 1119-1130, 2012.

# **MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN REGULADOR DE VELOCIDAD PARA UN MOTOR BLDC POR MEDIO DE UN CONTROLADOR DE HISTÉRESIS POR CORRIENTE**

*MODELING AND SIMULATION OF A SPEED CONTROLLER FOR A BLDC MOTOR, USING A HYSTERESIS CURRENT CONTROLLER*

**Jorge Luis Flores Mejía**

Universidad Politécnica de Tulancingo  
*1631002@upt.edu.mx*

**José Humberto Arroyo Núñez**

Universidad Politécnica de Tulancingo  
*humberto.arroyo@upt.edu.mx*

**Iván de Jesús Rivas Cambero**

Universidad Politécnica de Tulancingo  
*ivan.rivas@upt.edu.mx*

**Héctor García Maldonado**

Universidad Politécnica de Tulancingo  
*1631003@upt.edu.mx*

## **Resumen**

En este documento se presenta el modelado de un motor BLDC (Brushless de corriente directa), se analiza su comportamiento dinámico a lazo cerrado, que está conformado de dos bucles uno interno y uno externo. El bucle interno consta de un controlador de histéresis de corriente en conjunto con un detector de cruce por cero de fuerza contra-electromotriz, que hace cumplir los comandos de corriente de fase en el estator proporcionados por el bucle externo, que cumple con la ley clásica de control PID en su versión de velocidad, que toma como referencia el valor de velocidad angular, dicha variable es obtenida después de derivar la información obtenida del detector de cruce por cero. El sistema es simulado en Matlab/Simulink, donde se observa que el sistema cumple su objetivo llevando la velocidad del motor al valor de referencia, el sistema es sometido a perturbaciones y el controlador responde de manera eficiente.

**Palabras clave:** *Controlador BLDC, controlador por histéresis, fuerza contra-electromotriz.*

## **Abstract**

Modeling of BLDC (brushless direct current) motor in this paper is presented, its dynamic behavior in a closed loop is analyzed with two loops, the first one, internal loop, consist of a current hysteresis controller and a zero crossing detector of the back electromotive force, enforces the stator phase current commands provided by the second external loop, which consists of a classic PID control law in its speed version to adjust the angular velocity at reference value, this variable is obtained after deriving the information obtained from the zero crossing detector. The system is simulated in Matlab / Simulink, it is observed that the system achieves its objective by bringing the motor speed to the reference value, the system is subjected to disturbances and the controller responds efficiently.

**Keywords:** *back electromotive force, BLDC controller, hysteresis controller.*

## **1. Introducción**

Los motores BLDC son motores síncronos de imanes permanentes operados con voltaje DC, donde la conmutación de corriente se hace con dispositivos de estado sólido [Xia, 2012]. La conmutación es determinada por la posición angular del rotor, la cual puede ser detectada por sensores de posición o técnicas que implican la medición del voltaje inducido en los devanados; las principales ventajas de estos motores son: mantenimiento casi nulo, larga vida de operación, rápida respuesta dinámica, altos rangos de velocidad y buena relación torque peso [Adel, 2016]. El control de motores BLDC, son hoy en día una rama importante en la investigación en el área de control, este tipo de motores tiene la peculiaridad de que su fuerza contra-electromotriz es de forma trapezoidal, las corrientes de estator idealmente son requeridas de forma rectangular, sin embargo en la práctica; debido al hecho de poseer una inductancia por fase, la corriente rectangular no puede ser realizada, por lo tanto la estructura del controlador es simple, pero difícil de implementar [Krishnan, 2010].

Para mantener las corrientes de estator en forma rectangular, se pueden usar 2 estrategias de control: PWM o controlador de corriente por histéresis, en la tabla 1 se hace una comparación de las características de ellas [Krishnan, 2001].

Tabla 1 Comparación de controladores de corriente.

Características	Histéresis	PWM
Frecuencia de switcheo	Variable	Fijo
Velocidad de respuesta	Muy rápida	Rápida
Corriente de rizado	Ajustable	Fijo
Perdida de switcheo	Alta	Baja

A nivel simulación las variables de estado del sistema son obtenidas a partir del modelo matemático; físicamente son comúnmente obtenidas mediante sensores instalados en el motor. Para obtener la posición angular de un motor de este tipo existen 2 opciones: la primera y más común consta de un sensor de efecto Hall o un encoder; la segunda, que corresponde a la detección de cruce por cero del voltaje medido de los devanados, que comúnmente se le conoce como la medición de la fuerza contra-electromotriz, las ventajas de usar el segundo método son [Atmel Corporation, 2013], [Xia, 2012]:

- Alta confiabilidad, en ciertas condiciones como pueden ser alta temperatura, presión y humedad.
- Decremento del volumen del sistema.
- No se requiere acople mecánico para la instalación de un sensor.
- Dado que la señal obtenida proporciona información medida directamente de los devanados, actualmente es de interés para los investigadores dado el inconveniente de ondulado de par.

En la literatura se han encontrados diferentes tipos de controladores aplicados a motores BLDC, implementados con un control PID. La señal de salida del controlador ajusta el ciclo de trabajo de un PWM y provee el valor de voltaje necesario en los devanados para llegar al valor de referencia. Dado que la frecuencia del PWM es fija, no se tiene un control preciso del flujo de corriente y se ve reflejado en sobre impulso como es visto en [Krishnan, 2010].

El inconveniente debido a los sobre impulso han sido solventados, realizando cambios en el controlador, sustituyendo un PID por un PI anti-impulso [Mohd, 2016]. Con ello se logra alcanzar la velocidad de referencia, sin presencia de sobreimpulso. Otra forma de mejorar considerablemente el controlador, es usando un control adaptable en conjunto con un PWM, con esto se obtiene una respuesta rápida y sin presencia de sobre impulso, pero aumenta los requerimientos en capacidad de procesamiento computacional [Adel, 2016].

En este trabajo se presenta el diseño y simulación de un controlador de velocidad de un motor BLCD, utilizando la técnica de un controlador de corriente por histéresis. Dentro de las ventajas de este tipo de controles, se tiene frecuencia de conmutación variable y precisión del flujo de corriente haciendo cambios instantáneos en la corriente de estator. Para evitar cortos circuitos y un correcto flujo de corriente entre los devanados, el controlador de corriente es sincronizado con la posición angular del rotor, obtenida de un análisis de detección de cruce por cero de la fuerza contra-electromotriz.

El control de corriente por histéresis se desarrolla en un lazo interno del sistema, mientras que en un lazo externo se tiene un controlador de tipo PID. El PID es el encargado de proporcionar los valores de referencia de corriente para el bucle interno, este tipo de controlador es utilizado en aplicaciones para regulación velocidad, debido a que posee las características de utilizar la segunda derivada del error, logrando con ello cambios reducidos en la señal de control cuando la velocidad este por alcanzar el valor de referencia [Aguado, 2003].

## **2. Métodos**

Previo al diseño de los controladores, se obtiene el modelo matemático que representa la dinámica del sistema.

### **Modelado del motor BLDC**

En este análisis se presenta el diagrama eléctrico de un motor BLDC de tres fases conectado en estrella, con un driver de seis conmutadores. La figura 1 muestra el esquema simplificado del motor BLDC y el controlador de conmutación.

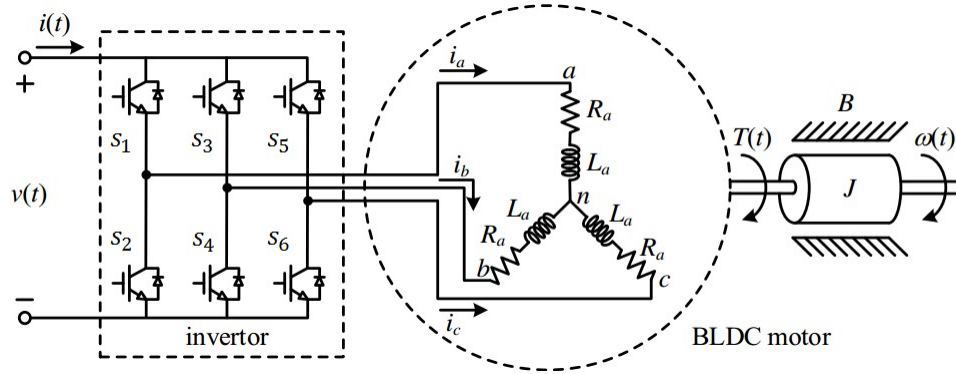


Figura 1 Diagrama eléctrico motor BLDC [Danupon, 2015].

El modelo es descrito con 5 variables de estado, tres corresponden a las corrientes del estator ( $i_a, i_b, i_c$ ), una a la velocidad angular ( $\omega_m$ ), y la última a la posición angular del rotor ( $\theta_m$ ) [Xia, 2012], [Krishnan, 2010]. Las ecuaciones de corriente son obtenidas a partir del análisis de las ecuaciones de voltaje de cada fase al punto neutro “n”, considerando un equilibrio de corrientes mostrado en la ecuación 1, las corrientes del estator resultan como se muestra en ecuaciones 2 a la 4.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L - M} (V_{an} - R_s i_a - e_a) \quad (2)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{1}{L - M} (V_{bn} - R_s i_b - e_b) \quad (3)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \frac{1}{L - M} (V_{cn} - R_s i_c - e_c) \quad (4)$$

El voltaje por fase al punto neutro  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$  están descritas por ecuación 5 [Haitao, 2016].

$$V_{an} = V_a - V_n, \quad V_{bn} = V_b - V_n \quad \text{y} \quad V_{cn} = V_c - V_n \quad (5)$$

El voltaje en el punto neutro “n” está descrito por la ecuación 6 [Haitao, 2016].

$$V_n = \frac{v(t) - e_a - e_b - e_c}{3} \quad (6)$$

El torque electromagnético del motor BLDC,  $T_e$  está dado por la ecuación 7.

$$T_e = \frac{e_A i_A + e_B i_B + e_C i_C}{w_m} \quad (7)$$

Realizando el análisis de balance de torques en la flecha del motor, la ecuación mecánica resulta como la ecuación 8.

$$\frac{dw}{dt} = (T_e - T_l - B_v w) \frac{1}{J} \quad (8)$$

Donde,  $T_l, J, B_v$  corresponden al par de carga, momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa respectivamente [Xia, 2012]. La posición angular está dada por la ecuación 9.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P}{2} w \quad (9)$$

Siendo  $P$  el número de polos par, la fuerza contra-electromotriz  $e_a, e_b, e_c$  está dado por la ecuación 10.

$$\begin{aligned} e_a &= f_a(\theta) k_b w_m \\ e_b &= f_b(\theta) k_b w_m \\ e_c &= f_c(\theta) k_b w_m \end{aligned} \quad (10)$$

Donde  $k_b$  representa la constante de fuerza contra-electromotriz y  $f_a(\theta)$  es la función dependiente de  $\theta$  que tiene forma trapezoidal con un ancho plano de  $120^\circ$ , esta fuerza es descrita por la ecuación 11 [Mohd, 2016].

$$f_A(\theta) = \begin{cases} \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta & 0 < \theta < \frac{\pi}{6} \\ 1 & \frac{\pi}{6} < \theta < \frac{5\pi}{6} \\ -\left(\frac{6}{\pi}\right)\theta + 6 & \frac{5\pi}{6} < \theta < \frac{7\pi}{6} \\ -1 & \frac{7\pi}{6} < \theta < \frac{11\pi}{6} \\ \left(\frac{6}{\pi}\right)\theta - 12 & \frac{11\pi}{6} < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (11)$$

Para el caso de  $f_A$  y  $f_C$ , son representadas por las ecuaciones 12 y 13.



$$f_B(\theta) = f_A\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (12)$$

$$f_C(\theta) = f_A\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \quad (13)$$

El sistema descrito por las ecuaciones 2, 3, 4, 8 y 9 muestra que existen ciertos cambios en el tiempo en  $e_a, e_b, e_c$  conforme el rotor gira, por lo tanto el sistema muestra ser, variante en el tiempo, múltiples entradas, múltiples salidas MIMO [Xia, 2012].

### Esquema de control para el motor BLDC

El esquema de control es mostrado en la figura 2, consta de dos bucles, uno externo y uno interno delimitado por las líneas punteadas. El bucle interno recibe como retroalimentación las señales de corriente del estator y la posición angular obtenidos del detector de cruce por cero, este bucle se encarga de llevar las corrientes de estator al valor de referencia.

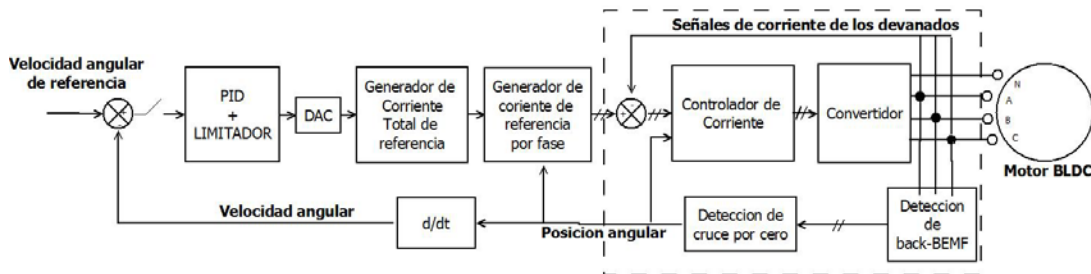


Figura 2 Esquema de control para el motor BLDC.

La señal de referencia es comparada con la señal de retroalimentación, se obtiene un error que es muestreado y procesado por el bloque de PID discreto, la salida de control discreta es la entrada al bloque de DAC, proporcionando como salida un torque de referencia.

El siguiente bloque “Generador de corriente por fase” se encarga de generar las corrientes por fase del estator  $(i_a, i_b, i_c)$ , esto es considerando que por cada rango de posiciones mostradas en la tabla 2, corresponden dos corrientes con sentido opuesto, estas corrientes pasan a ser las entradas al bucle interno.

El bloque principal del bucle interno es el controlador de corriente por histéresis, su función es llevar las corrientes de estator al valor de referencia, a la salida proporciona las señales de conmutación para cada dispositivo del inversor mostrado en la figura 1.

La posición angular es obtenida a partir del bloque llamado “Detección de back-EMF”, dicho bloque reconstruye las señales de posición en tres variables de tipo booleano esto es mostrado más extendidamente en la tabla 2, para construir las señales se hace un análisis de diferencia de voltajes a la señal de la fuerza contra-electromotriz.

### Controlador PID en su versión de velocidad

El controlador tipo PID en su versión para velocidad es modelado mediante ecuaciones 14 y 15.

$$\Delta u(k) = K_p \left[ (\Delta e(k)) + \frac{T_c}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_c} (\Delta^2 e(k)) \right] \quad (14)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad y \quad \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \quad (15)$$

Donde:

$u(k)$  Variable discreta de control en tiempo  $k$ .

$e(k)$  Representa el valor del error en el instante  $k$ .

$K_p, T_i$  y  $T_d$  Representa la ganancia proporcional, integral y derivativa.

$T_c$  Periodo de muestreo.

Las ecuaciones 14 y 15 trabajan con la segunda derivada del error pues el término derivativo de la forma de velocidad es equivalente a  $\Delta(\Delta e(k))$ , que representa la aproximación discreta de la segunda derivada [Gene, 1998]. Así mismo es observado que la expresión (14), lleva sumado una muestra anterior de la señal de control, haciendo que la señal de control sea pequeña para cuando la variable de interés este por alcanzar el valor de referencia eliminando así sobre impulso causado por la acción integral.

### Bloques de referencias de corrientes de estator

El valor  $u(t)$  obtenido del bloque DAC (Ver figura 2), corresponde al valor de torque deseado  $T_e^*$  que tiene valores dentro de un rango como se muestra en la ecuación 16.

$$T_e^* = u; \quad -T_m \leq u \leq T_M \quad (16)$$

El valor de referencia para la corriente total de estator  $I_p^*$  es dado por la ecuación 17 [Xia, 2012], [Krishnan, 2001].

$$I_p^* = \frac{T_e^*}{2\lambda_p} \quad (17)$$

Donde  $\lambda_p = k_b * \frac{P}{2}$ . El valor de corriente individual de los devanados del estator es generado a partir de la posición angular del rotor, se tienen seis posiciones como se muestra en la tabla 2, cada posición activa dos devanados de manera simultánea.

Con el bloque llamado “Generador de corriente total de referencia”, que tiene como entrada el torque de referencia, al ser multiplicada la entrada por la ecuación 14, a la salida proporciona una corriente total  $i(t)$  que circulara en el circuito mostrado en la figura 1.

### Bloques de controlador de corriente

En el presente trabajo un controlador de corriente por histéresis es implementado en simulación como controlador principal del bucle interno, este es encargado de generar las señales de conmutación para los dispositivos del circuito controlador de los devanados definidos por las ecuaciones 18 a la 23.

$$S_1 = (i_a \leq (i_a^* - \Delta i))(0 \leq \theta \leq 120^\circ) \quad (18)$$

$$S_2 = (i_a \geq (i_a^* + \Delta i))(180 \leq \theta \leq 300^\circ) \quad (19)$$

$$S_3 = (i_b \leq (i_b^* - \Delta i))(120 \leq \theta \leq 240^\circ) \quad (20)$$

$$S_4 = (i_b \geq (i_b^* + \Delta i))(0 \leq \theta \leq 60^\circ) + (i_b \geq (i_b^* + \Delta i))(300 \leq \theta \leq 360) \quad (21)$$

$$S_5 = (i_c \leq (i_c^* - \Delta i))(240 \leq \theta \leq 360^\circ) \quad (22)$$

$$S_6 = (i_c \geq (i_c^* + \Delta i))(60 \leq \theta \leq 180^\circ) \quad (23)$$

Donde  $S_x$ , representa cada conmutador de la figura 1,  $i_x$ , representa la corriente en el estator por fase,  $i_x^*$ , la corriente de referencia en el estator por fase,  $\Delta i$  valor constante que denota el ancho entre el límite superior e inferior de la corriente de referencia.

El funcionamiento del controlador por histéresis se describe a continuación: Si el conmutador  $S_1$  es activado entonces el devanado de la fase A es conectado a  $+v(t)$ , si el conmutador  $S_4$  es activado el devanado de la fase B es conectado a  $-v(t)$ , si ambos conmutadores se encuentran en estado inactivo, entonces la corriente circulara según su sentido actual por el efecto de los diodos *freewheeling*. Cada conmutador es conectado dependiendo de la posición del rotor para evitar conexiones en corto circuito en el circuito físico y un correcto flujo de la corriente entre los devanados, por ello en el bloque del controlador de corriente es contemplada la posición a partir del análisis del detector de cruce por cero.

### Detección de cruce por cero de la señal fuerza contra-electromotriz

En este documento es presentada la herramienta más común de detección de la fuerza contra-electromotriz, que corresponde a la detección de cruce por cero cada  $60^\circ$ , considerando las diferencias de la fuerzas contra-electromotriz definidas como  $e_x$ , se puede definir la posición del rotor utilizando la variable  $H_x$ , como se muestra en la ecuación 24 [Xia, 2012]. El resultado de este analisis puede ser visto en la seccion de resultados en la figura 8.

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} = \begin{cases} H_1 = 1 & (e_a - e_b) > 0 \\ H_2 = 1 & (e_b - e_c) > 0 \\ H_3 = 1 & (e_c - e_a) > 0 \\ H_1, H_2, H_3 = 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (24)$$

Con ayuda del modelo presentado en la ecuación 24 se genera la tabla 2 que corresponde a la secuencia de conmutación del sistema, se continua bajo el hecho de que, por cada rango de tiempo, corresponde a la conmutación de dos devanados simultáneamente, ver figura 1.

Tabla 2 Secuencia de conmutación del sistema.

$\theta$ (°)	Señal de sensor			Secuencia de conmutación						Corrientes de estator		
	H1	H2	H3	S1	S2	S3	S4	S5	S6	$i_a$	$i_b$	$i_c$
0-60	1	0	1	1	0	0	1	0	0	+i	-i	0
60-120	1	0	0	1	0	0	0	0	1	+i	0	-i
120-180	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	+i	-i
180-240	0	1	0	0	1	1	0	0	0	-i	+i	0
240-300	0	1	1	0	1	0	0	1	0	-i	0	+i
300-360	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	-i	+i

### 3. Resultados y Discusión

#### Escenario 1

Se realizan tres pruebas, en el primer escenario se presenta la solución al sistema de ecuaciones 2, 3, 4, 8 y 9, el sistema tiene como entrada un voltaje de 160 V. En el tiempo de 0.2 segundos el sistema es sometido a una perturbación de 1 Nm en la flecha del rotor, la respuesta de velocidad es mostrada en la figura 3 y la respuesta del par electromagnético es mostrada en la figura 4, los parámetros del motor BLDC son dados en la tabla 3.

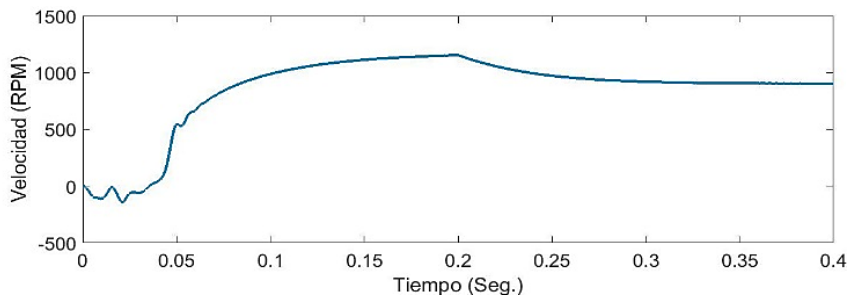


Figura 3 Respuesta en el tiempo de la velocidad angular a lazo abierto.

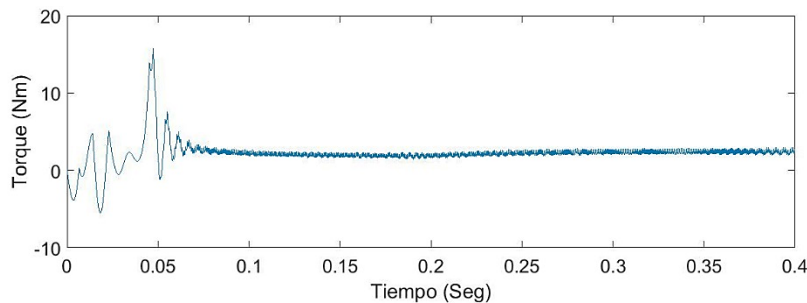


Figura 4 Respuesta en el tiempo del par generado a lazo abierto.

Tabla 3 Parámetros del sistema.

Parámetro	Valor
Resistencia por fase	0.7 $\Omega$
Inductancia propia por fase	2.72 $mH$
Inductancia mutua por fase	1.5 $mH$
Momento de inercia	0.0002 $kg - m/s^2$
Coefficiente de fricción viscosa	0.002 $Nm/rad/s$
Constante de fuerza contra-electromotriz	0.5128 $V/rad/$
Polos	4
Voltaje	160 $V$
Potencia	0.5 $hp$

En este primer escenario, observando la figura 3, es posible analizar la dinámica de velocidad con el siguiente comportamiento: se muestra que en el arranque presenta oscilaciones en el intervalo de 0 a 0.035 segundos, posteriormente en el intervalo de 0.035 segundos a 0.05 segundos, el motor acelera bruscamente, en el intervalo de 0.05 segundos a 0.2 segundos el motor acelera suavemente hasta alcanzar una velocidad de 1,100 rpm, en 0.2 segundos el motor es perturbado, y se observa que la velocidad hace asíntota en 900 rpm.

Por otro lado, la figura 4 muestra el comportamiento del par electromagnético, se aprecia que el motor presenta cambios bruscos en el intervalo 0 segundos a 0.07 segundos, el motor no alcanza a proporcionar el torque requerido de 1 Nm, además de presentar ondulado de par.

## Escenario 2

El sistema es simulado a lazo cerrado de acuerdo al diagrama bloques de la figura 2, donde en el bucle interno, que contiene el controlador de corriente por histéresis, es hecho programando una máquina de estados finita, dando con ello la conmutación al par de devanados correspondientes, en función de las señales obtenida en las ecuaciones 18 a la 23, y acorde a cada intervalo de posición obtenida del análisis de la expresión 24. Se usa un limitador de corriente considerando que una fuente real no proporciona la cantidad de Amperaje requerida en simulación. Para elegir las ganancias del controlador externo PID, fue obtenida la función de transferencia del motor BLDC, se obtuvieron las ganancias correspondientes mediante la herramienta sisotool de Matlab.

En simulación a lazo cerrado se define una referencia de 1,200 RPM, con un voltaje de alimentación de 160 VDC. En el tiempo de 0.1 segundos el sistema es perturbado con un par de carga en la flecha de 1 Nm.

La figura 5 muestra la respuesta en velocidad, en la misma se puede observar el siguiente comportamiento: Al tiempo 0.05 segundos, donde el sistema solicita una referencia de 1,200 rpm, el motor tiende a acelerar presentando sobre impulsó menor al 10% en un tiempo de asentamiento de 0.1 segundos, para lo cual es aceptable tratándose de un controlador PID a un sistema de parámetros variables, cabe mencionar que el hecho de considerar el PID en su versión de velocidad, se tiene un mejor pronóstico de la señal de error, minimizando con esto el sobreimpulso causante por la acción integral. En el instante de tiempo que el sistema es perturbado por una carga de 1 Nm, el motor tiene una ligera caída de 50 rpm pero este tiende a recuperarse.

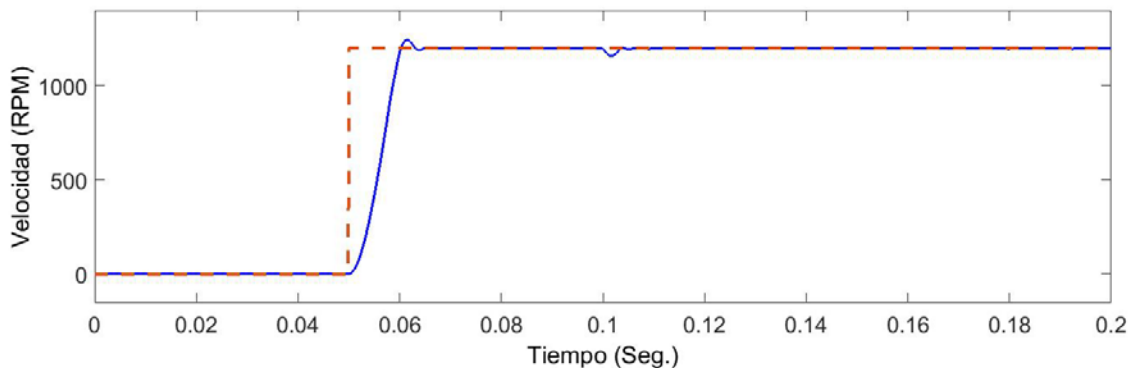


Figura 5 Respuesta en el tiempo de la velocidad angular a lazo cerrado.

En la figura 6 se muestra la respuesta de la par generado, en tiempo 0.05 segundos, el par incrementa considerablemente debido al requerimiento para romper la inercia del rotor, una vez que el rotor alcanza la velocidad de referencia en 1200 RPM, el par se estabiliza en un valor cercano a 0.2 Nm, en el tiempo 0.01 segundos que el sistema es perturbado, el par incrementa rápidamente a alcanzar el valor requerido, se presenta aun ondulado de Par, para la disminución de este fenómeno actualmente se está trabajando en la robustez del controlador interno con adelanto de fase.

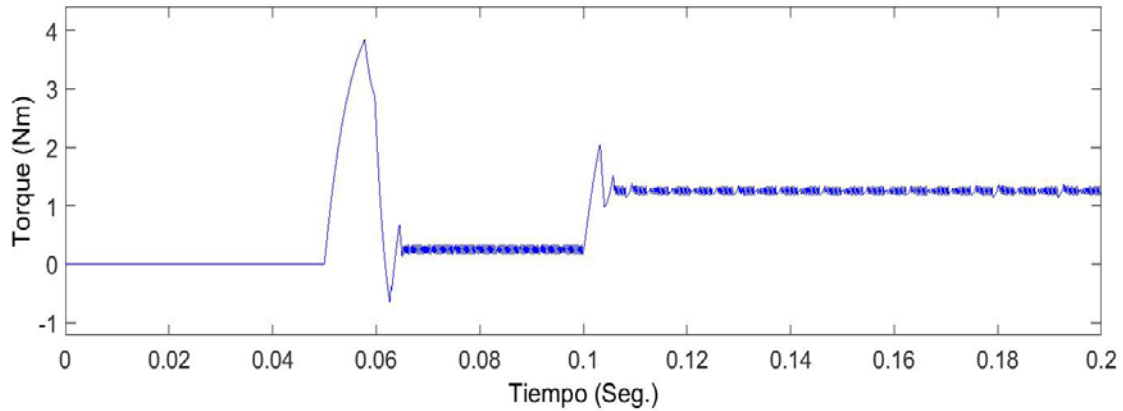


Figura 6 Respuesta en el tiempo del par generado a lazo cerrado.

La figura 7 muestra las corrientes en el devanado de estator, similar a los casos anteriores, en el momento de solicitar cambio de referencia de cero a 1200 RPM, la corriente incrementa considerablemente, en el tiempo *0.062 segundos* que la velocidad se estabiliza; la corriente también se estabiliza en un valor aproximado de 3 Amperes, en el instante *0.1 segundos* que existe la perturbación de 1 Nm, el sistema demanda un incremento de corriente para mantener la velocidad ante el incremento de carga inducido, esta corriente es soportada en los devanados del estator, donde  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ , corresponden a las señales de color negro, rojo y azul respectivamente, se aprecia que la corriente se acerca a la forma rectangular deseada dado por la tabla 1, no ocasionando cortos y cada fase de corriente lleva su sentido en tiempo.

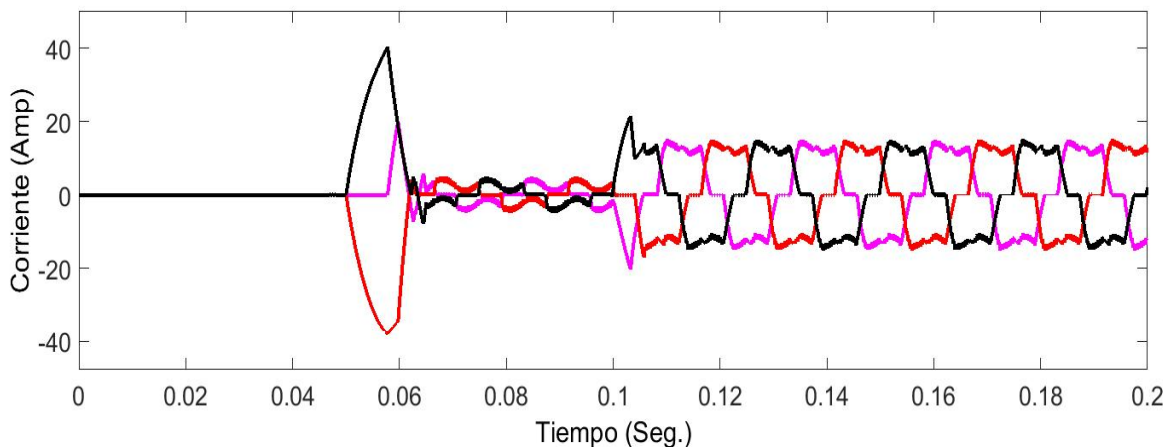


Figura 7 Respuesta en el tiempo de la corriente en el estator a lazo cerrado.



La figura 8, muestra la posición angular obtenida de la expresión (24), esta señal es esencial para el correcto funcionamiento de la máquina de estados, dado que con la información de posición se determina que par de devanados deben ser conmutados, como ya fue previamente mencionado en la tabla 2.

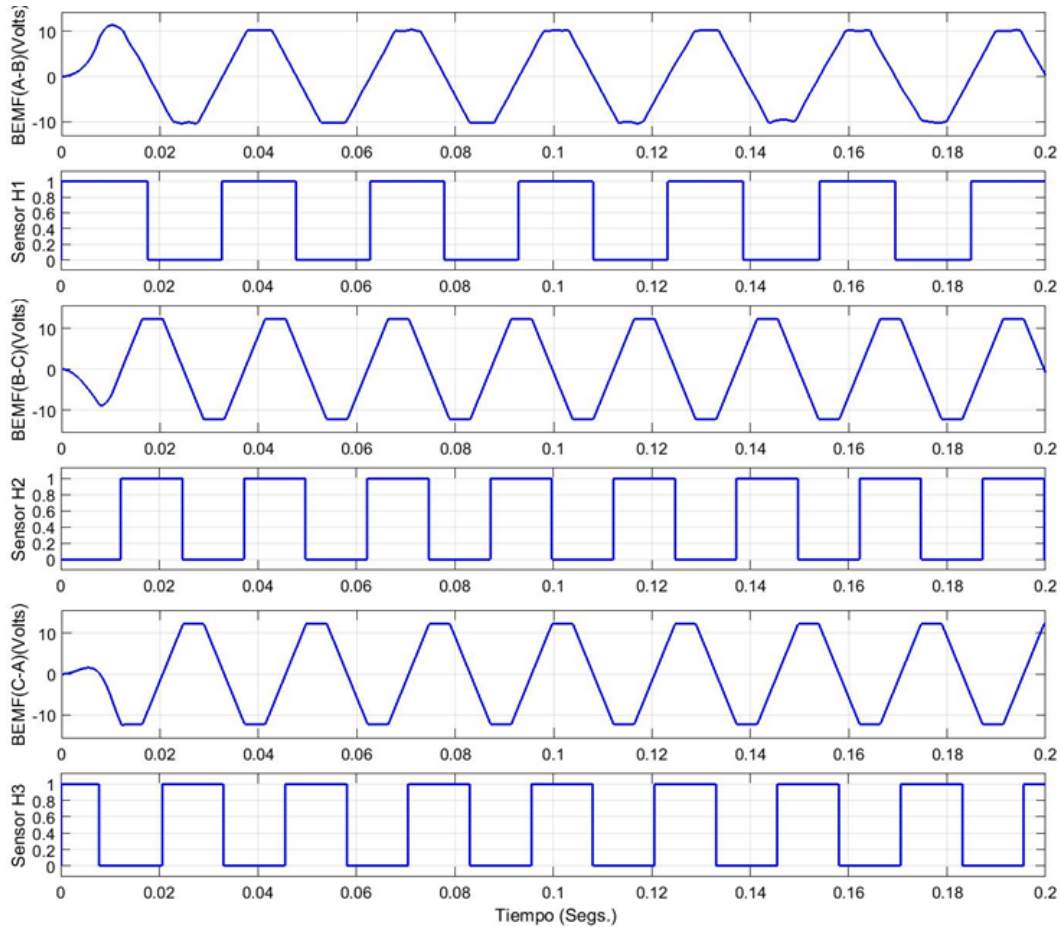


Figura 8 Posición angular, resultado de la ecuación 24.

### Escenario 3

En el tercer escenario, se usa la topología del escenario 2 a diferencia que en este caso el sistema fue sometido ante una señal de referencia de tipo cuadrada con una amplitud de 1200 rpm y un periodo de 0.14 segundos

La figura 9 muestra el comportamiento dinámico de la velocidad angular ante una referencia con una señal de tipo cuadrada dada por la línea punteada de color rojo, se observa que el sobre impuesto para cada semi-ciclo en alto es variable,

esto se debe a la variación de parámetro del sistema, pero es posible observar que el sobre impulso no excede el 10%.

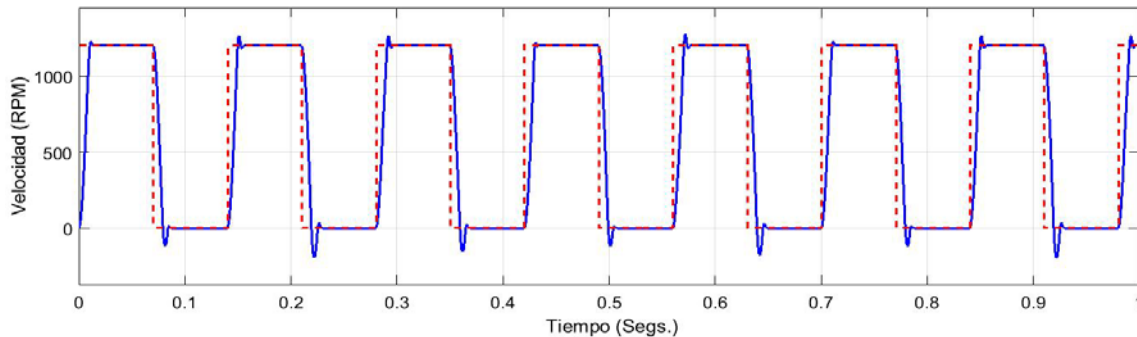


Figura 9 Respuesta de velocidad.

Por otro lado, se observa un sobre impulso variable mayor al 10% para cada ciclo en bajo, para solucionar este inconveniente se está trabajando en un algoritmo para PID autoajustable, el sistema tiene un tiempo de asentamiento rápido.

#### 4. Conclusiones

En el presente documento se muestra una forma de implementación de un controlador de velocidad para un motor BLDC, la ventaja principal, es el trabajo en conjunto de un controlador de histéresis y un detector de cruce por cero, que de manera confiable entrega la información de posición del rotor, siempre y cuando el motor esté operando sin algún fallo mecánico o eléctrico. Otra ventaja es encontrada en el uso del controlador clásico PID donde fue considerada la primera derivada para la ganancia proporcional, la segunda derivada para la ganancia derivativa y una muestra anterior sumada de la señal de control, teniendo un mejor pronóstico cuando la variable de interés se acerca al valor de referencia, se puede concluir que con herramientas básicas es posible construir un controlador de velocidad para un motor BLDC reduciendo costos computacionales, y de experimentación considerando como un desarrollo pronto la implementación física. A pesar de las pequeñas variaciones que se presentaron en el escenario 3, donde el sistema tuvo comportamiento distinto para cada ciclo, el controlador de

corriente, con el controlador PID tuvieron resultados sobresalientes, llevando el sistema a la estabilidad. Con el propósito de reducir el sobre-impulso variable que se pudo observar, se está trabajando en una estrategia de control adaptable.

## 5. Bibliografía y Referencias

- [1] Adel A. El-samahy, Mohamed A. Shamseldin. Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control. *elsevier*, 2016: 12.
- [2] Aguado Alberto, Martinez Iranzo Miguel. *Identificación y Control Adaptativo*. Universidad de Sevilla, España: Pearson, 2003.
- [3] Atmel Corporation. *Atmel AVR928: Scalar Sensorless Methods to drive BLDC Motors. Enabling Unlimited Possibilities*, 2013.
- [4] Danupon Kumpania, Sattarpoom Thaiparnat, Deacha Puangdownreong. *Parameter identification of BLDC motor model via metaheuristic optimization techniques*. Elsevier, 2015.
- [5] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael Workman. *Digital Control Of Dynamic Systems*. Ellis-Kagle Press, 1998.
- [6] Haitao Li, Xin Ning, Wenzuo Li. *Implementacion of MFAC based position sensorless drive for high speed BLDC motors with nonideal BEMF*. Elsevier, 2016: 7.
- [7] Krishnan, R. *Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control*. Virginia Tech, Blacksbur, VA: Prentice Hall, 2001.
- [8] Krishnan, R. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Blacksburg, Virginia, U. S. A.: Taylor and Francisc Group, 2010.
- [9] Mohd Tariq, T. K. Bahattacharya, Nidhi Varshney, Dhilsha Rajapan. *Fast response antiwindup PI speed Controller of Brushless DC motor drive, Modeling Simulation and implementacion on DSP*. Elsevier, 2016: 13.
- [10] S. Dominguez, P. Campoy. *Control en el espacio de estado*. Madrid, España.: Pearson, 2006.
- [11] Xia, Chang-liang. *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drive And Controls*. P. R. China: Wiley, 2012.

# **ENCRIPTADOR DE IMÁGENES EN ESCALA DE GRISES CON LLAVES CAÓTICAS**

*BLAK AND WHITE IMAGE ENCRYPTION WITH CHAOTIC KEYS*

**Héctor Garcés Guzmán**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*hgarces@uacj.mx*

**Víctor Manuel Hinostrroza Zubia**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*vhinostr@uacj.mx*

**Priscila Betsabe Hernández Valadez**

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
*al131466@alumnos.uacj.mx*

## **Resumen**

Los avances tecnológicos del siglo XXI han proporcionado a la población con herramientas robustas para la distribución de la información. Hoy en día es más fácil y rápido compartir conocimiento de cualquier tipo, sin importar las distancias. Todo esto gracias a la red de computadoras que intercomunica al mundo entero; sin embargo, se presentó un problema importante, la seguridad de la información. Como respuesta a lo anterior, se han propuesto modelos de cifrado de imágenes que requieren de procesos diferentes de los actualmente utilizados, uno de estos es la utilización de llaves caóticas. El propósito de este artículo es dar a conocer los resultados de un proyecto de investigación donde se desarrolló un sistema de cifrado de imágenes en escala de grises en una Raspberry Pi a base de llaves caóticas, empleando múltiples mapas caóticos. Se evaluó su comportamiento mediante dos pruebas, histograma y entropía.

**Palabras Claves:** Caos, encriptación, telecomunicaciones.

## **Abstract**

*The technological advances of the 21st century have provided the population with robust tools for information distribution. Nowadays, it is easier and faster to*

*share knowledge of any kind, regardless of distance. All this thanks to the computer network that interconnects the whole world; however there was a major problem, information security. In response to the above, have been proposed models of image encryption that require different processes from those currently used, one of these is the use of chaotic keys. The purpose of this article is to present the results of a research project where an encryption system of grayscale images was developed in a Raspberry PI based on chaotic keys, using multiple chaotic maps. Their behavior was evaluated by two tests, histogram and entropy.*

**Keywords:** *Chaos, encryption, telecommunications.*

## **1. Introducción**

Una de las bases de la ciencia es la relación que se busca entre causa y efecto. Es posible predecir la ocurrencia de ciertos fenómenos naturales gracias a las leyes establecidas con las que se describe su comportamiento. El desarrollo del cálculo por Isaac Newton aceleró el avance de las ciencias. Aportó la herramienta base para el desarrollo de sistemas y fórmulas utilizadas en la representación de los fenómenos naturales. Una de las características de la época Newtoniana era el determinismo. Este principio establecía que el estado presente de cierto sistema era la consecuencia del estado anterior y la causa del estado futuro. La única dificultad presente para pronosticar los estados era recopilar suficiente información [Bonev, 1995].

Con las leyes de Newton y el cálculo diferencial como herramienta, los científicos comenzaron a buscar ecuaciones que explicaran y describieran los fenómenos naturales, encontrando un orden en el universo. Sin embargo, existen fenómenos que son complicados de describir matemáticamente, normalmente no lineales y por ende es difícil predecir su estado futuro a largo plazo. El ejemplo por excelencia de estos fenómenos naturales es el estado del tiempo. Cuando se habla de él se le considera impredecible y aleatorio, pues aparentemente no existe en su comportamiento una relación clara entre causa y efecto. Por lo contrario, el clima de una región es estable y predecible. Inicialmente se creyó que la imprevisibilidad del estado del tiempo era debido a falta de información precisa, sin embargo,

algunas de las conclusiones de la teoría del caos proveen otro punto de vista para este aparente problema. Pues se propone que los sistemas deterministas simples, incluso con pocos elementos, pueden presentar un comportamiento aleatorio que no desaparece con obtener más información del sistema. Esta aparente aleatoriedad es llamada caos [Broer, 2009].

Actualmente los científicos se refieren como caóticos a aquellos sistemas con movimientos complicados no aleatorios que presentan un crecimiento rápido de error. Para estos sistemas, a pesar de ser de carácter determinista, es imposible hacer predicciones acertadas a largo plazo del estado del sistema. Por lo contrario, a corto plazo es posible estimar su valor con una buena certeza. Dentro de la definición de caos la dependencia sensible hacia las condiciones iniciales juega un papel importante en el crecimiento del error y en la imposibilidad de predecir el estado futuro del sistema [Stewart, 2007]. La confidencialidad de la información siempre ha sido importante, esto con el fin de asegurar que únicamente la persona adecuada tenga acceso al mensaje. Por consiguiente, el cifrado de mensajes siempre ha sido una importante área de estudio. La ciencia encargada de estudiar, diseñar y crear algoritmos para cifrar información se conoce como criptografía. Su contraparte es el criptoanálisis, la ciencia encargada de estudiar y romper la encriptación, es decir, encontrar la llave del algoritmo aplicado a la información para tener acceso al mensaje original. Al conjunto de estas dos ciencias se le llama Criptología. Los algoritmos de encriptado para la seguridad de un sistema de comunicaciones deben tener como punto fuerte la llave y no tanto el proceso usado para el cifrado. En consecuencia, hay una gran demanda por explorar nuevas técnicas y herramientas en el desarrollo de llaves, como puede ser el caso de las señales caóticas. En particular porque éstas destacan por tener varias propiedades como: ergodicidad, amplio ancho de banda, comportamiento pseudo aleatorio, alta sensibilidad a las condiciones iniciales y atractores.

## **2. Métodos**

Algunos sistemas no lineales deterministas bajo ciertas condiciones pueden generar una señal que presenta un comportamiento estocástico, a pesar de que

su naturaleza es esencialmente determinista. Se han observado estos sistemas en áreas de estudio tan dispares como: biología, física, química, matemáticas, economía, meteorología, geología, ingeniería, etc. Un oscilador caótico discreto y unidimensional se define como una función no lineal iterativa o de mapeo  $f: \phi \rightarrow \phi$  que puede ser escrita como se muestra en la ecuación 1.

$$\phi_{(k+1)} = f(\phi_k) \tag{1}$$

En numerosos sistemas no lineales dinámicos discretos unidimensionales se ha observado un comportamiento caótico; en particular en la tabla 1 se muestra la definición matemática de los mapas considerados para el análisis reportado en este documento [Garces, 2016].

Tabla 1 Mapas caóticos.

Mapa	Definición	Régimen caótico
Bernoulli	$\phi_{(k+1)} = \begin{cases} B\phi_k + A & \phi_k < 0 \\ B\phi_k - A & \phi_k > 0 \end{cases}$	$\phi_k \in [-A, A] \quad 0 < B < 2$
Chebyshev	$\phi_{(k+1)} = \cos(B \arccos(\phi_k))$	$\phi_k \in [-1, 1] \quad 1 < B < 10$
Coseno	$\phi_{(k+1)} = A \cos(\phi_k + B)$	$\phi_k \in [-A, A]$ $2 < A < 10$ ó $-\pi < B < \pi$
Cuadrático	$\phi_{(k+1)} = B - (A\phi_k^2)$	$\phi_k \in \left[-\frac{2}{A}, \frac{2}{A}\right] \quad \frac{3}{4} < AB < 2$
Cúbico 1	$\phi_{(k+1)} = C(3\phi_k - 4\phi_k^3)$	$\phi_k \in [-C, C] \quad 0 < C < \infty$
Exponencial	$\phi_{(k+1)} = \phi_k \exp(B(A - \phi_k))$	$\phi_k \in \left[0, \frac{\exp(AB - 1)}{B}\right]$ $AB > 2$
Hopping	$\phi_{(k+1)} = \begin{cases} D(\phi_k - A) + C & \phi_k > A \\ B\phi_k &  \phi_k  \leq A \\ D(\phi_k + A) - C & \phi_k < -A \end{cases}$	$\phi_k \in [-C, C]$ $B, -D > 1 \quad C = BA$
Logístico	$\phi_{(k+1)} = B(A^2 - \phi_k^2) - A$	$\phi_k \in [-A, A]$ $\frac{3}{2} < AB < 2$
Tienda	$\phi_{(k+1)} = A - B \phi_k $	$\phi_k \in [A(1 - B), A]$ $0 < B < 2$

A pesar de que las funciones mostradas en la tabla 1 son deterministas, poseen características peculiares. Una manera de observar su comportamiento es variar el valor de los parámetros constantes (A, B, etc.) dentro de un rango

predeterminado, como resultado se obtiene el denominado diagrama de bifurcación. Particularmente para el mapa coseno, en la figura 1 se ilustra su evolución al variar el parámetro  $A$  en el rango de  $[1.5\ 3]$ . En esta grafica claramente se distinguen dos regiones, en la primera por ejemplo para  $A = 1.7$  el resultado de todas las iteraciones siempre es el mismo  $\phi(k) = \pm 1.5$ , esto es dentro de la zona determinista. Por lo contrario, para  $A = 2.25$  el resultado de cada iteración varia en un rango aproximado de  $\phi(k) \in [-2.2\ 2.2]$ , esta es un área de operación caótica. Un análisis cuidadoso de la figura 1 muestra una alternancia o bifurcación entre regiones caóticas y deterministas.

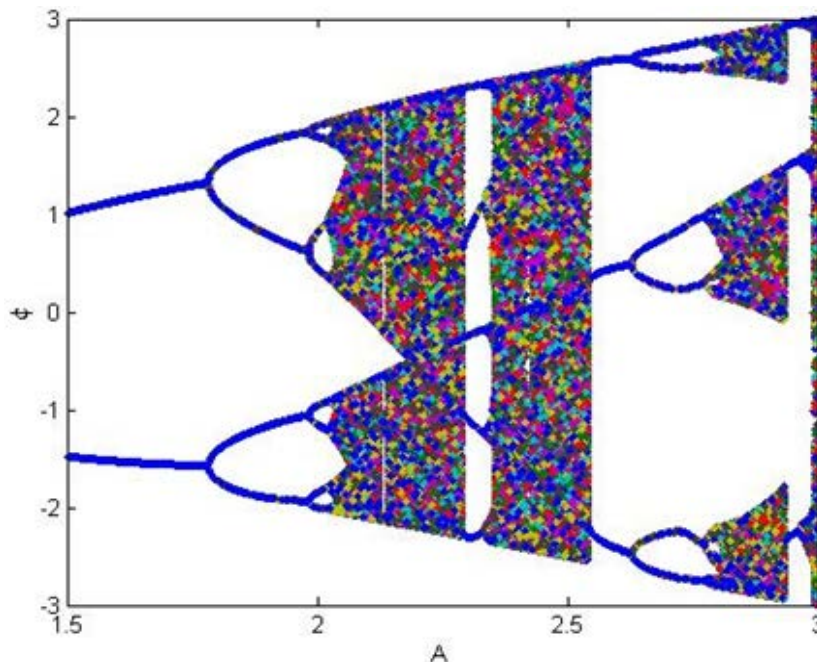


Figura 1 Diagrama de bifurcación del mapa coseno.

El diseño del encriptador digital tiene como elemento esencial del proceso al operador booleano XOR para la adición de la llave cifradora a la imagen original. Esto se puede observar en el diagrama presentado en la figura 2. Para realizar su implementación la opción más viable fue la Raspberry Pi, por las siguientes razones: procesador de cuatro núcleos, memoria RAM de la que dispone, puertos con los que cuenta, capacidad de procesamiento que ofrece y el software que la controla. Estas especificaciones técnicas junto con el poder de procesamiento de



la tablilla se consideraron suficientes para la ejecución correcta y rápida del sistema de encriptación.

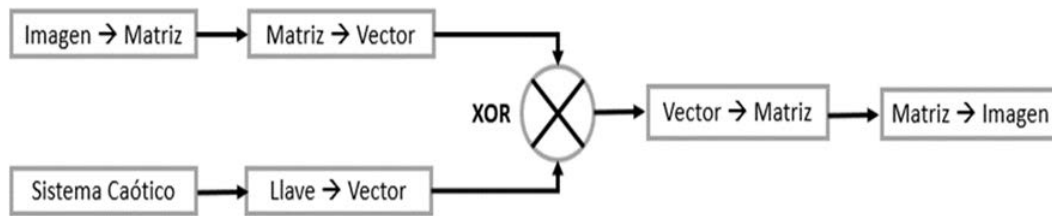


Figura 2 Encriptador digital de imágenes.

Se recurrió a la programación modular utilizando el lenguaje Python en su versión 3.6. En este caso, con la finalidad de facilitar la implementación del algoritmo, buscando hacerlo de una forma clara, definiendo secciones de código para funcionalidades específicas y repetitivas durante el proceso. Los archivos de código fuente se organizaron en dos secciones, la primera abarcando los scripts para la generación de las llaves caóticas, siendo un script por sistema caótico, la segunda sección se conformó por un script principal encargado de llamar a los scripts de las llaves caóticas y del proceso de encriptación. También se incluyó una sección de scripts para la definición de variables, tales como los directorios en los que se almacenaron las imágenes, así como los valores iniciales que se tomaron de las zonas caóticas de los sistemas. La estructura del contenido de estos scripts es similar en todos los casos analizados en este proyecto, el proceso total se ilustra en la figura 3.

### 3. Resultados

Para obtener una cantidad significativa de muestras para el análisis del algoritmo se seleccionaron tres imágenes distintas en escala de grises: eight, logo y Lena. Estas figuras son empleadas normalmente en el procesamiento de imágenes y están incorporadas en casi todas las librerías de los paquetes de software, por ejemplo, Matlab incluye las dos primeras. A ellas se les aplicaron cada una de las llaves caóticas, por sistema y por parámetro. Estas imágenes de prueba difieren en dos aspectos; tamaño y entropía.

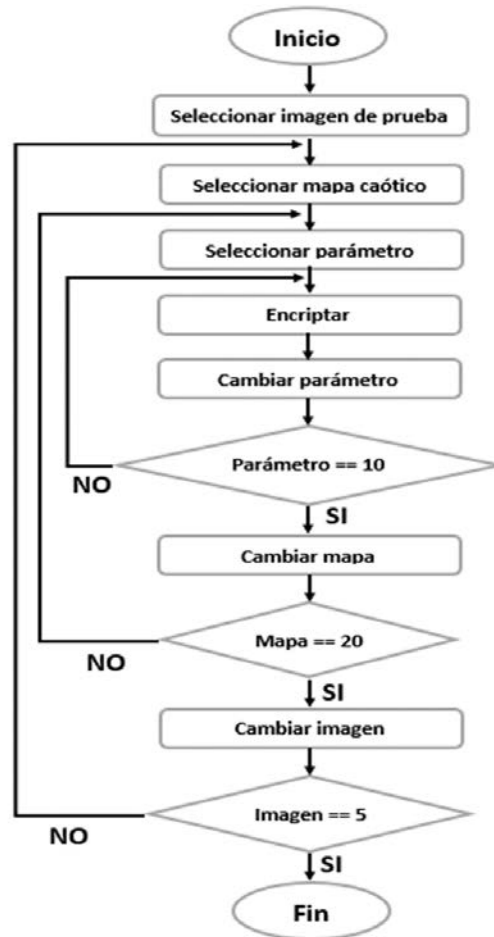


Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo de encriptación.

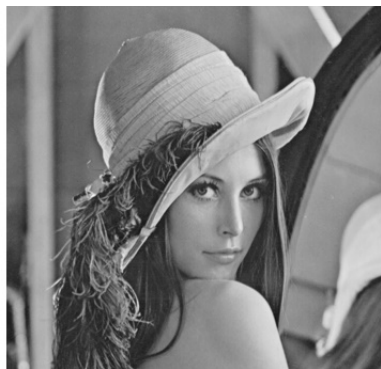
En la tabla 2 se resumen estas características. Además, con la finalidad de analizar las fortalezas que presentan cada uno de los sistemas caóticos utilizados, se variaron los parámetros del mapa considerando valores que permitan la operación en la zona caótica.

Tabla 2 Características principales de las imágenes de prueba.

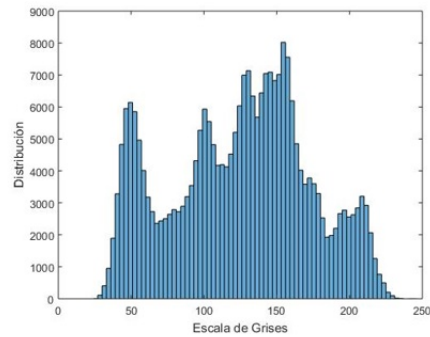
Imagen	Tamaño en pixeles	Entropía
eight.tif	242x308	4.8796
lena.bmp	512x512	7.4455
logo.tif	107x122	1

Para este proyecto se consideraron adecuadas dos pruebas en las que se analizó el contenido de las imágenes de salida del sistema encriptador. El histograma fue

la primera evaluación realizada esperando conocer la distribución de probabilidad de los valores de los píxeles. Para continuar, se tomó en cuenta la entropía como un parámetro útil y necesario para conocer el desorden contenido en la imagen, antes y después de la encriptación. En la figura 4 se puede apreciar como los valores de los píxeles para la imagen de Lena varían dentro del rango posible para la escala de grises, presentando picos en los valores más recurrentes y depresiones en los que no son tan comunes. En cambio, en la figura 5, se exhibe la imagen de Lena encriptada con una llave basada en el sistema tienda y su histograma. Lo que se observó en todos los histogramas de las imágenes encriptadas fue una distribución de probabilidad casi uniforme de valores en la escala de grises. Del contenido de estos histogramas no es posible obtener información concreta de la imagen original gracias a la distribución uniforme, confirmando la eficacia del proceso de cifrado al que fue sometida.

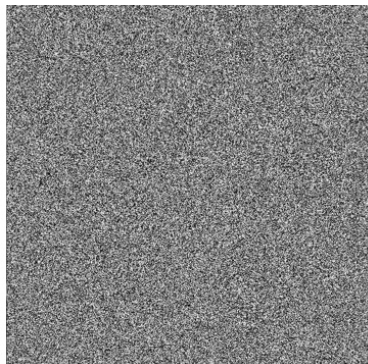


a) Lena.

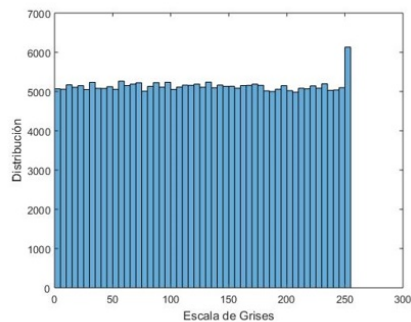


b) histograma.

Figura 4 Lena original.



a) Lena.



b) histograma.

Figura 5 Lena encriptada.

Para continuar con el análisis de las imágenes encriptadas se calculó su valor de entropía. Con la obtención de estos valores se determinó el desorden existente en el valor de los píxeles. Para lograr una mayor comprensión de la diferencia existente entre la entropía calculada en la imagen original a la obtenida en la encriptada se compararon estos valores en las tablas 3, 4 y 5. Si se analizan primero los valores de entropía ilustrados en la tabla 2 de las imágenes originales se detectan variaciones considerables entre ellos. Por ejemplo, una imagen simple como logo tiene una entropía baja, en cambio Lena es una imagen con muchos contrastes dando como resultado que su entropía sea alta. Al continuar comparando ahora las imágenes encriptadas es posible observar como los valores de entropía son muy similares entre sí, independientemente si provienen de valores iniciales distintos, de sistemas caóticos diferentes o incluso de diferentes imágenes. Como se puede observar todos los datos obtenidos están cerca del valor máximo de entropía; que es ocho.

Tabla 3 Entropía de la imagen eight.

Sistema	eight.tif	
	Original	Encriptada
Bernoulli	4.8796	7.99363618
Chebyshev	4.8796	7.99445732
Congruente	4.8796	7.99468391
Coseno	4.8796	7.9943531
Cúbico 1	4.8796	7.99551106
Exponencial	4.8796	7.99359114
Hopping	4.8796	7.9944538
Logístico	4.8796	7.99426404
Tienda	4.8796	7.99488021

Tabla 4 Entropía de la imagen Lena.

Sistema	lena.bmp	
	Original	Encriptada
Bernoulli	7.4455	7.99910979
Chebyshev	7.4455	7.99926031
Congruente	7.4455	7.99936243
Coseno	7.4455	7.99927294
Cúbico 1	7.4455	7.99923364
Exponencial	7.4455	7.99913019
Hopping	7.4455	7.99924383
Logístico	7.4455	7.99918969
Tienda	7.4455	7.99927253

Tabla 5 Entropía de la imagen logo.

Sistema	logo.tif	
	Original	Encriptada
Bernoulli	1	7.9591309
Chebyshev	1	7.95530339
Congruente	1	7.9596725
Coseno	1	7.95750567
Cúbico 1	1	7.95355538
Exponencial	1	7.95413802
Hopping	1	7.95273317
Logístico	1	7.95706527
Tienda	1	7.95391654

#### **4. Discusión**

A partir de este trabajo es posible continuar con la investigación acerca del caos como una opción para la encriptación de información digital. En el caso específico de las imágenes, se considera como posible trabajo futuro el diseño y desarrollo de un sistema de encriptación para imágenes a color, las cuales presentan una estructura diferente a las compuestas por escala de grises, que se utilizaron en este proyecto. También podrían tomarse en cuenta sistemas caóticos no contemplados en esta investigación, como son los de más de una dimensión. Aquí se estaría buscando analizar la eficacia de las nuevas llaves cifradoras, por consiguiente, se tendría un panorama más amplio.

Considerando los resultados la encriptación de imágenes usando llaves que provengan de un sistema caótico es una manera relativamente simple y barata de encriptar imágenes, con hardware y software de uso común y fácilmente accesible. Los resultados demuestran también que la imagen encriptada aumenta su entropía casi a su límite máximo, sin aumentar excesivamente el tiempo de procesamiento y costo.

#### **5. Conclusiones**

En este proyecto se diseñó y construyó un encriptador de imágenes que emplea llaves caóticas, con el algoritmo de cifrado implementado en Python utilizando como plataforma la Raspberry Pi 3. Como sujetos de prueba se seleccionaron tres imágenes en escala de grises, y como resultado de la ejecución del proceso de

encriptación se obtuvieron cerca de quinientas imágenes cifradas. Para comprobar la efectividad del proceso de cifrado, las imágenes encriptadas se sometieron a dos diferentes análisis el histograma y su entropía.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, se puede concluir que la mayoría de los sistemas caóticos seleccionados para la implementación del encriptador son eficaces. El rendimiento que presentaron como generadores de llaves de cifrado para imágenes fue apropiado al presentar valores satisfactorios en las pruebas.

Como trabajo futuro se podrían implementar estos algoritmos en imágenes en tonos de gris o a color, usando llaves generadas con otros sistemas caóticos e implementados en hardware y software con otras características.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Bonev Ivan Ivanov, *La Teoría del caos*, Primera. Buenos Aires: Rundinguskín, 1995.
- [2] Broer Henk, Takens Floris, *Dynamical Systems and Chaos*, vol. 139. New York: Springer, 2009.
- [3] Chen Guanrong, Mao Yaobin, Chui Charles K., A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps, *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 21, no. 3, pp. 749–761, 2004.
- [4] Espinoza Illanes, Marcos, *Cifrado de imágenes digitales basado en teoría del caos: mapas logísticos*, Tesis maestría, pp. 1–20, 2014.
- [5] Gao, T. G. y Chen, Z. Q, A new image encryption algorithm based on hyper chaos. *Physics Letters A*, 372(4): 394–400, 2008.
- [6] Isabelle Steven. H., *A Signal Processing Framework for the Analysis and Application of Chaotic Systems*, Ph.D. Dissertation, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, May 1995.
- [7] Garcés Guzmán Héctor, Hinostrza Zubía Victor Manuel, Peña Alarcón Deana Larisa, Enríquez Edwin Antonio, *Modificaciones en la rapidez de sincronización por sistemas acoplados de señales caóticas unidimensionales*, Congreso Internacional de Investigación Tijuana, Revista

- Aristas: Investigación Básica y Aplicada, Tijuana, BC., Vol. 5, Núm. 9, pp. 38 - 42, febrero 2016.
- [8] Garcés Guzmán Héctor, Hinostrza Zubía Victor Manuel, Priscila Betsabe Hernández Valadez, Estudio de la estructura estadística de las señales caóticas, Congreso Internacional de Investigación Tijuana, Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada, Marzo 2017, Tijuana, BC., Vol. 6, Núm. 11, pp. 150–154.
- [9] Madrid Casado Carlos M., Historia de la Teoría del Caos contada para escépticos: Cuestiones de génesis y estructura, Encuentros Multidisciplinarios., pp. 1–15, 2010.
- [10] Peitgen Heinz-Otto, Hartmut Jürgens Dietmar Saupe, Chaos and Fractals, Second. New York: Springer, 2004.
- [11] Smart Nigel Paul, Cryptography: An Introduction, New York: McGraw Hill, 2010.
- [12] Stewart Ian, Historia de las matemáticas en los últimos 10000 años. España: Crítica, 2007.

# **EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE RADIO COGNITIVO CON DIFERENTES DISTRIBUCIONES DEL TIEMPO DE SERVICIO DE LOS USUARIOS SECUNDARIOS**

*EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF COGNITIVE RADIO SYSTEMS WITH DIFFERENT DISTRIBUTIONS OF THE SERVICE TIME OF SECONDARY USERS*

**Diego García Olivares**

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco  
*dgoroyl@gmail.com*

**Genaro Hernández Valdez**

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

**Sandra Lirio Castellanos López**

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

**Felipe Alejandro Cruz Pérez**

Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional  
*facruz@cinvestav.mx*

**Grethell Georgina Pérez Sánchez**

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

## **Resumen**

Este trabajo estudia el desempeño de sistemas de radio cognitivo con diferentes distribuciones de probabilidad del tiempo de servicio de los usuarios secundarios. Para ello, se desarrolló un simulador de eventos discretos del sistema de radio cognitivo. En particular, se considera que el tiempo de servicio de los usuarios secundarios sigue una distribución de probabilidad log-normal y ésta es aproximada mediante distribuciones de probabilidad hiper-exponenciales de diferente orden. Para el cálculo de los parámetros de las distribuciones hiper-exponenciales se utiliza el algoritmo de Maximización de la Esperanza (EM). Los resultados obtenidos muestran que, mediante la distribución hiper-exponencial se pueden aproximar



diferentes distribuciones de probabilidad como la log-normal sin pérdida significativa en la precisión de los resultados numéricos de las diferentes métricas de desempeño. Este resultado es relevante porque facilita el tratamiento y análisis matemático de sistemas de radio cognitivo.

**Palabras Claves:** Distribución hiper-exponencial, maximización de la esperanza, radio cognitivo.

## **Abstract**

*In this paper, performance evaluation of cognitive radio networks (CRNs) with different probability density functions for the service time of secondary users is studied. To this end, a discrete event simulation program that captures the fundamental aspects of CRNs is developed. In particular, it is assumed that the secondary service time of many real life applications is well characterized by the log-normal distribution. In this work, the log-normal model is systematically approximated by  $n$ -th order hyper-exponential distributions. The parameters of the  $n$ -th order hyper-exponential distribution are computed by the well-known Expectation Maximization (EM) algorithm. Numerical results show that, the hyper-exponential distribution can be used for approximating the log-normal behaviour of the secondary service time without significant loss of precision on the obtained results for the different performance metrics. This result is relevant because the mathematical (queueing) analysis of CRN with log-normal service time is possible by means of approximating the log-normal behavior of the service time by the hyper-exponential model.*

**Keywords:** *cognitive radio networks, expectation maximization, hyper-exponential distribution.*

## **1. Introducción**

En los últimos años, radio cognitivo ha sido un concepto ampliamente estudiado en el área de las telecomunicaciones [Shanidul, 2017]. De manera elemental, una red de radio cognitivo (CRN) ésta constituida por dos tipos de usuarios: primarios (PUs) y secundarios (SUs), operando en una misma zona de cobertura. Los SUs

comparten de manera oportunista los recursos de la red primaria. Esto es, los PUs tienen prioridad sobre los SUs en la utilización de los recursos del sistema de comunicaciones. En otras palabras, cuando un usuario primario (PU) intenta acceder a los recursos del sistema que está siendo utilizado por un usuario secundario (SU), éste último debe liberar inmediatamente el recurso para que pueda ser utilizado por el PU [Aguilar-Rentería, 2011] [Filin, 2011]. De esta manera, el funcionamiento de la red secundaria debe ser transparente para la red primaria. Sin embargo, el desempeño de la red secundaria está en función de la ocupación de los recursos por parte de los PUs. Debido a la naturaleza aleatoria de la ocupación de los recursos, el desempeño de los sistemas de comunicaciones es analizado empleando herramientas de probabilidad para modelar variables temporales tales como el tiempo de sostenimiento de la llamada (también conocido como tiempo de servicio), tiempo entre arribos, tiempo de sostenimiento de canal, entre otras [Shanidul, 2017]. En algunos trabajos se ha considerado que el tiempo de servicio puede modelarse como una variable aleatoria (v.a.) con distribución de probabilidad exponencial negativa [Zhu, 2007] [Zhang, 2008]; sin embargo, esta distribución no describe adecuadamente el comportamiento de las variables temporales en los sistemas de comunicaciones actuales [Shanidul, 2017] [Bolotin 1994] [Orlik, 1998]. Se ha reportado en la literatura que la distribución log-normal mejora la precisión de la caracterización del tiempo de servicio con respecto a casos reales [Shanidul, 2017] [Abate, 1994] [Wang, 2007]. A pesar de esto, al ser una distribución que no posee la propiedad “sin memoria”, no es posible utilizarla en un modelo de teletráfico basado en cadenas de Markov. Por esta razón, en el presente trabajo se aproxima la distribución de probabilidad log-normal mediante una distribución tipo fase cuyos elementos básicos (i.e., etapas) poseen la propiedad “sin memoria”. En particular, se utiliza la distribución hiper-exponencial para éste fin. Los parámetros de la distribución hiper-exponencial, que aproxima alguna distribución en particular, se obtienen mediante el algoritmo de Maximización de la Esperanza (EM) [Asmussen, 1996].

Dentro de los trabajos relacionados se encuentra [Shanidul, 2017]. En [Shanidul, 2017], se analiza el desempeño de un sistema de radio cognoscitivo considerando

distribuciones generales (Erlang- $m$ , lognormal) del tiempo de servicio de los SUs. En [Shanidul, 2017], los autores concluyen que la distribución log-normal es la más adecuada para modelar el tiempo de servicio de los SUs en el análisis del desempeño de CRNs. Por otra parte, en [Serrano-Chavez, 2017] se desarrolló un modelo matemático aproximado basado en cadenas de Markov para evaluar el desempeño de CRNs donde la distribución del tiempo de servicio se aproximó utilizando la distribución hiper-exponencial de orden  $n$ . A diferencia de [Serrano-Chavez, 2017], en el presente trabajo se desarrolla un simulador de eventos discretos para estudiar el efecto del coeficiente de variación (CoV) del tiempo de servicio en el desempeño de una CRN. Otro trabajo relacionado es [Saleem, 2014], donde se realiza una revisión exhaustiva de los modelos que se han utilizado para caracterizar el tiempo de servicio de los PUs y la forma en la que afectan el desempeño de una CRN. A diferencia de [Saleem, 2014], el presente trabajo trata con el modelado del tiempo de servicio de los SUs en CRNs.

## 2. Métodos

El simulador del sistema de radio cognitivo que se desarrolló en el lenguaje de programación C, se basa en el simulador de un sistema de llamada bloqueada, llamada perdida y se realizó siguiendo el algoritmo descrito en las figuras 1, 2 y 3.

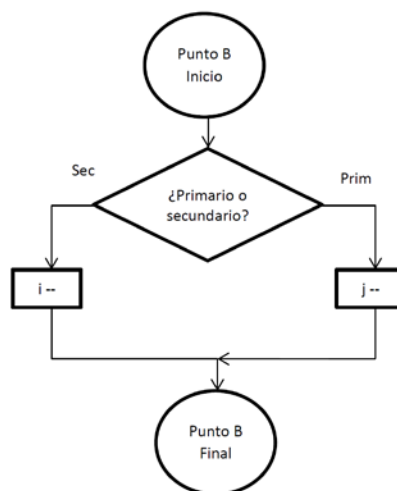


Figura 1 Diagrama de flujo del simulador del sistema de radio cognitivo (3ª parte).

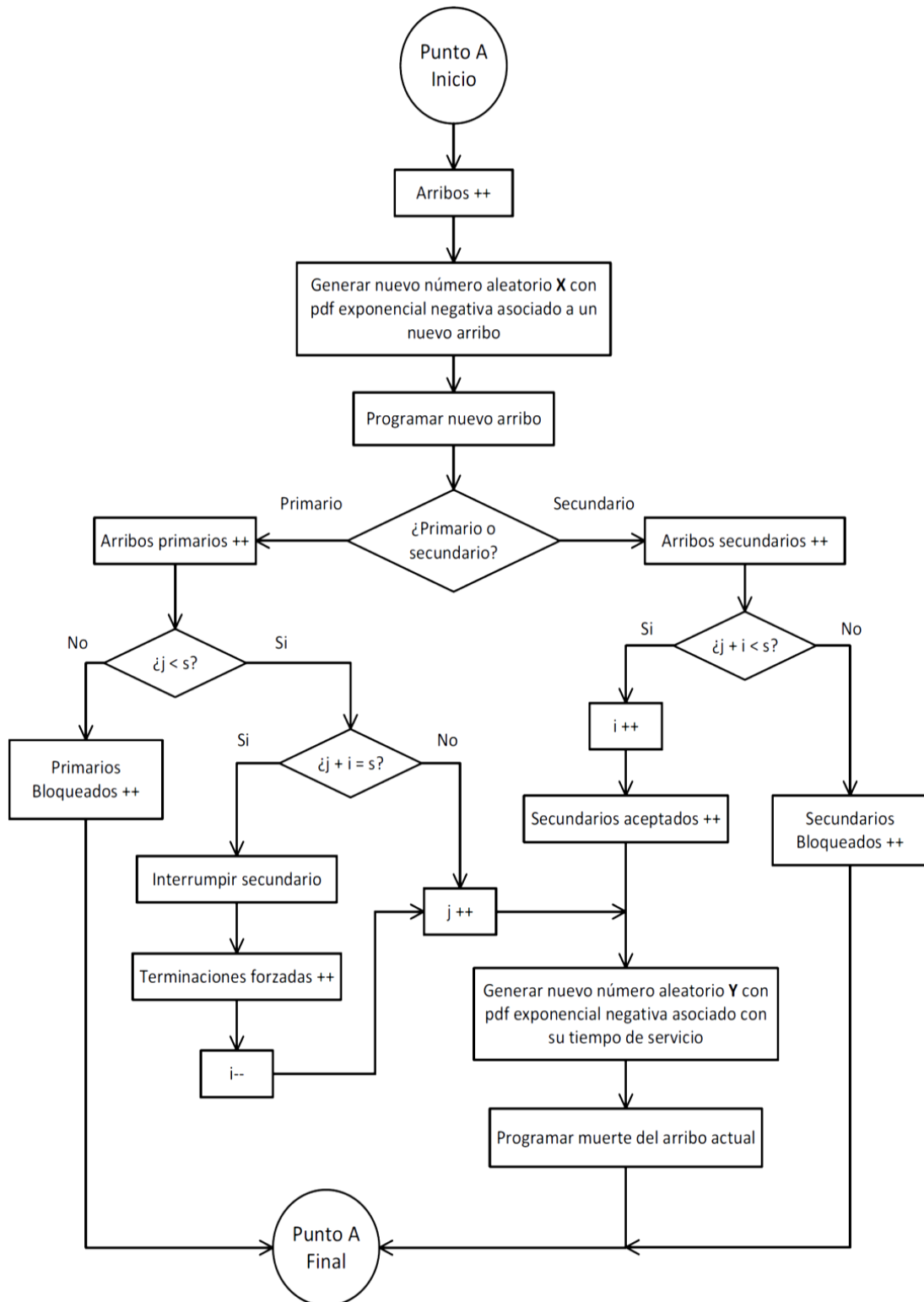


Figura 2 Diagrama de flujo del simulador del sistema de radio cognitivo (2ª parte).

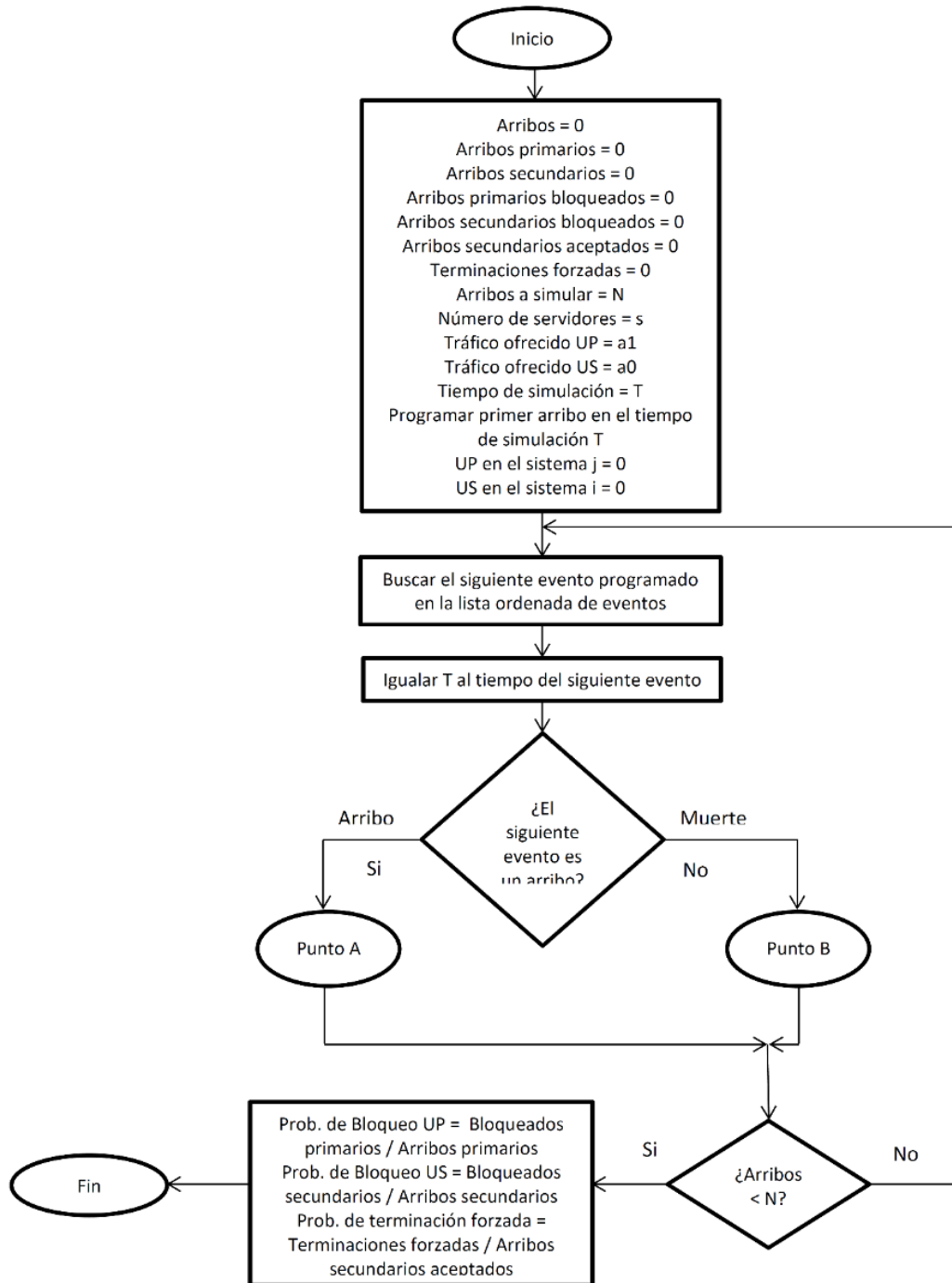


Figura 3 Diagrama de flujo del simulador del sistema de radio cognitivo (1ª parte).

Como se mencionó, en el sistema se consideran dos tipos de usuarios. La red primaria cuenta con un número  $s$  de servidores (canales) y los SUs tienen acceso a éstos recursos siempre y cuando no estén siendo utilizados por los PUs. Si todos los recursos del sistema están ocupados cuando un PU realiza una petición de

servicio y al menos existe un SU en servicio, éste debe concluir su servicio para que el PU pueda ser atendido. Se dice entonces que el SU experimenta una interrupción de llamada debido a la petición de servicio de un PU. Para evaluar el desempeño de la red secundaria se consideran dos métricas de calidad de servicio: la probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas y la probabilidad de terminación forzada de llamada.

La probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas de SUs (PUs)  $P_b^{(S)}$  ( $P_b^{(P)}$ ) es la proporción de peticiones de servicio que no pueden ser atendidas debido a insuficiencia de recursos. Por otro lado, la probabilidad de terminación forzada  $P_{ft}^{(S)}$  es la proporción de las peticiones de servicio de SUs admitidas en el sistema pero que son forzadas a terminar por las peticiones de servicio de los PUs. Se considera que el proceso de arribos de ambos tipos de usuarios es de Poisson. Así, el tiempo entre arribos para los PUs es una v.a.  $X_a^{(P)}$  con distribución de probabilidad exponencial negativa con parámetro  $\lambda^{(P)} = 1/E\{X_a^{(P)}\}$  y una v.a.  $X_a^{(S)}$  con distribución de probabilidad exponencial negativa con parámetro  $\lambda^{(S)} = 1/E\{X_a^{(S)}\}$  para los SUs. El tiempo de servicio de los PUs se modela como una v.a. exponencial negativa  $X_s^{(P)}$  con parámetro  $\mu_s^{(P)} = 1/E\{X_s^{(P)}\}$ . Por otro lado, se considera que el tiempo de servicio de los SUs tiene distribución de probabilidad exponencial negativa, log-normal e hiper-exponencial de orden  $n$ . Se consideró un tiempo medio de servicio de 180 segundos para todas las distribuciones de probabilidad y diferentes valores del coeficiente de variación (CoV) para las distribuciones log-normal e hiper-exponencial. La ecuación 1 muestra la expresión matemática de la función de densidad de probabilidad (pdf) log-normal. Los parámetros de la distribución log-normal se reportan en la tabla 1.

Tabla 1 Valores numéricos de los parámetros de la distribución log-normal para obtener los valores de la media y coeficiente de variación especificados.

$E(X)$	$CoV$	$Desv. Estandar$	$V(X)$	$\sigma$	$\mu$
180	2	360	129600	1.268636	4.388237
	5	900	810000	1.805019	3.563908
	10	1800	3240000	2.126276	2.979959

$$f_X(t) = \left( \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \right) u(t) \quad (1)$$

La pdf hiper-exponencial de orden  $n$  está dada por la expresión (2).

$$f_X(t) = \sum_{i=1}^n P_i \lambda_i e^{-\lambda_i t} u(t) \quad (2)$$

Con ayuda del algoritmo EM se determinaron los parámetros de las distribuciones de probabilidad hiper-exponenciales de diferentes órdenes que aproximan la distribución log-normal. Para determinar los valores de estos parámetros se prosigue de la siguiente manera:

- Se generan números aleatorios con distribución log-normal con cierta media y varianza.
- En el algoritmo EM se especifica el número de fases deseadas (i.e., orden de la distribución hiper-exponencial).
- Se especifica el número de iteraciones deseadas (la aproximación mejora entre mayor sea el número de iteraciones), para este trabajo se utilizaron 1000 iteraciones, ya que con esta cantidad se obtuvieron buenas aproximaciones.
- Finalmente, el algoritmo EM entrega como datos de salida los valores de los parámetros de la distribución hiper-exponencial utilizada para aproximar la distribución log-normal.

Los parámetros de las distribuciones hiper-exponenciales de diferentes órdenes obtenidos se muestran en la tabla 2.

### 3. Resultados

Con el fin de realizar un análisis completo, se obtuvieron resultados numéricos de las probabilidades de bloqueo de llamadas nuevas y de terminación forzada de SUs en función del tráfico ofrecido de ambos tipos de usuarios. Para el cálculo de estos resultados se generó un millón de arribos de peticiones de servicio de usuarios, 30

servidores, el tiempo de servicio de los PUs se considera exponencial negativo con media 180 s y para el tiempo de servicio de los SUs se consideran las distribuciones de probabilidad exponencial negativa, log-normal e hiper-exponencial de diferente orden con media 180 s.

Tabla 2 Parámetros de las distribuciones hiper-exponenciales de orden  $n$  que aproximan distribuciones log-normal con coeficiente de variación CoV.

Distribución Log-normal		Distribución hiper-exponencial	
CoV	$n$	$\lambda_n$	$P_n$
2	2	$\lambda_1 = 1.765702 \times 10^{-3}$ $\lambda_2 = 9.925955 \times 10^{-3}$	$P_1 = 1.705689 \times 10^{-1}$ $P_2 = 8.294311 \times 10^{-1}$
	4	$\lambda_1 = 1.132026 \times 10^{-2}$ $\lambda_2 = 2.967125 \times 10^{-2}$ $\lambda_3 = 7.118179 \times 10^{-4}$ $\lambda_4 = 1.132026 \times 10^{-2}$	$P_1 = 1.242840 \times 10^{-1}$ $P_2 = 2.586565 \times 10^{-1}$ $P_3 = 2.088898 \times 10^{-2}$ $P_4 = 5.961705 \times 10^{-1}$
	6	$\lambda_1 = 2.967121 \times 10^{-3}$ , $\lambda_2 = 1.132037 \times 10^{-2}$ , $\lambda_3 = 1.132036 \times 10^{-2}$ , $\lambda_4 = 1.132008 \times 10^{-2}$ , $\lambda_5 = 4.118163 \times 10^{-4}$ , $\lambda_6 = 1.132037 \times 10^{-2}$	$P_1 = 2.586562 \times 10^{-1}$ , $P_2 = 1.718715 \times 10^{-1}$ , $P_3 = 8.798178 \times 10^{-2}$ , $P_4 = 3.001729 \times 10^{-1}$ , $P_5 = 2.088887 \times 10^{-2}$ , $P_6 = 1.604288 \times 10^{-1}$
5	2	$\lambda_1 = 1.527524 \times 10^{-3}$ $\lambda_2 = 2.559002 \times 10^{-2}$	$P_1 = 2.305409 \times 10^{-1}$ $P_2 = 7.694591 \times 10^{-1}$
	4	$\lambda_1 = 1.193668 \times 10^{-2}$ $\lambda_2 = 2.142928 \times 10^{-3}$ $\lambda_3 = 2.752712 \times 10^{-4}$ $\lambda_4 = 6.717739 \times 10^{-2}$	$P_1 = 4.389741 \times 10^{-1}$ $P_2 = 1.688855 \times 10^{-1}$ $P_3 = 1.646539 \times 10^{-2}$ $P_4 = 3.756750 \times 10^{-1}$
	6	$\lambda_1 = 4.876701 \times 10^{-4}$ , $\lambda_2 = 8.903031 \times 10^{-2}$ , $\lambda_3 = 7.255441 \times 10^{-3}$ , $\lambda_4 = 2.026486 \times 10^{-3}$ , $\lambda_5 = 7.471851 \times 10^{-5}$ , $\lambda_6 = 2.431217 \times 10^{-2}$	$P_1 = 2.440317 \times 10^{-2}$ , $P_2 = 2.458474 \times 10^{-1}$ , $P_3 = 2.676304 \times 10^{-1}$ , $P_4 = 1.192036 \times 10^{-1}$ , $P_5 = 1.377348 \times 10^{-3}$ , $P_6 = 3.415381 \times 10^{-1}$
10	2	$\lambda_1 = 1.460506 \times 10^{-3}$ $\lambda_2 = 5.042044 \times 10^{-2}$	$P_1 = 2.397328 \times 10^{-1}$ $P_2 = 7.602672 \times 10^{-1}$
	4	$\lambda_1 = 2.664741 \times 10^{-2}$ $\lambda_2 = 3.340898 \times 10^{-3}$ $\lambda_3 = 2.739843 \times 10^{-4}$ $\lambda_4 = 2.298163 \times 10^{-1}$	$P_1 = 4.412573 \times 10^{-1}$ $P_2 = 2.092771 \times 10^{-1}$ $P_3 = 2.702007 \times 10^{-2}$ $P_4 = 3.224455 \times 10^{-1}$
	6	$\lambda_1 = 1.045632 \times 10^{-3}$ , $\lambda_2 = 5.055893 \times 10^{-1}$ , $\lambda_3 = 2.594716 \times 10^{-2}$ , $\lambda_4 = 5.760932 \times 10^{-3}$ , $\lambda_5 = 1.193793 \times 10^{-4}$ , $\lambda_6 = 1.080195 \times 10^{-1}$	$P_1 = 6.923661 \times 10^{-2}$ , $P_2 = 1.291826 \times 10^{-1}$ , $P_3 = 3.059366 \times 10^{-1}$ , $P_4 = 2.124125 \times 10^{-1}$ , $P_5 = 7.346075 \times 10^{-3}$ , $P_6 = 2.758856 \times 10^{-1}$



Las figuras 4 y 5 muestran, respectivamente, las gráficas de las probabilidades de bloqueo de llamada nueva y de terminación forzada de SUs cuando el tiempo de servicio de los SUs es exponencial negativo. Se observa que ambas métricas son funciones monótonicamente crecientes de los tráficos ofrecidos primario y secundario. En la figura 5 se puede observar que el valor de la probabilidad de terminación forzada es más sensible al tráfico ofrecido de SUs que al tráfico ofrecido de PUs. Esto se debe a que, al incrementar el tráfico ofrecido secundario, el número de SUs en condiciones de ser interrumpidos aumenta.

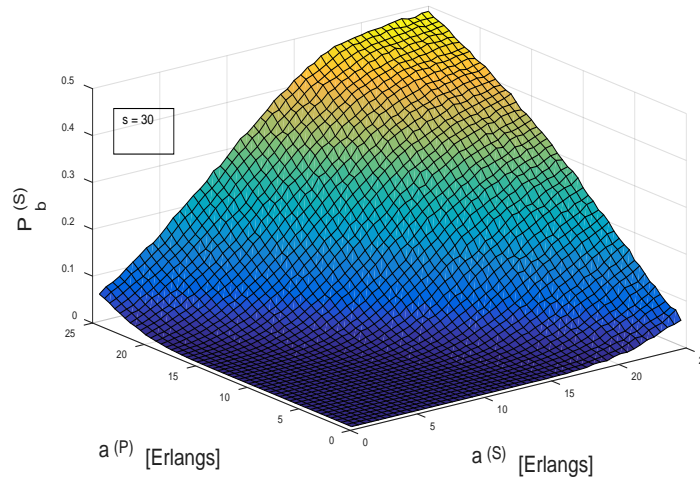


Figura 4 Probabilidad de bloqueo llamadas nuevas de SUs en función del tráfico ofrecido de los PUs y de los SUs con tiempo de servicio exponencial negativo.

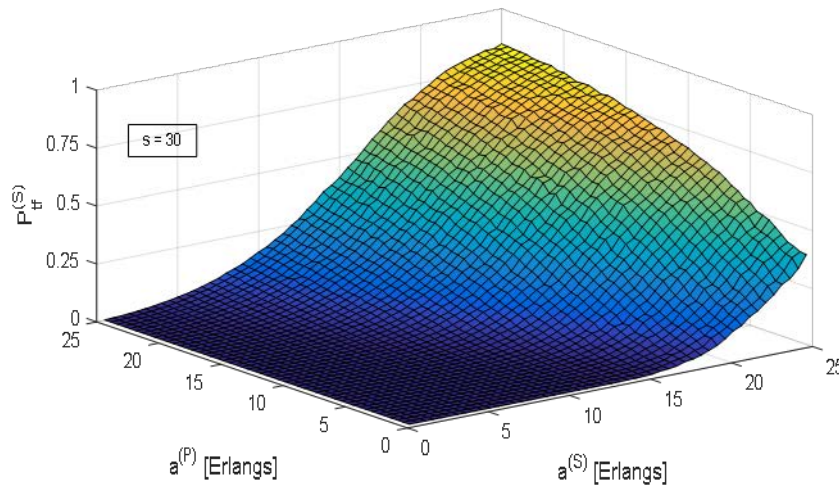


Figura 5 Probabilidad de terminación forzada de llamada de SUs en función del tráfico ofrecido de los PUs y de los SUs con tiempo de servicio exponencial negativo.

Posteriormente, se caracterizó el tiempo de servicio de los SUs con la distribución log-normal considerando diferentes valores del coeficiente de variación: 2, 5 y 10. De igual manera se utilizaron sus aproximaciones mediante las distribuciones de probabilidad hiper-exponenciales de diferente orden. Se consideraron los mismos escenarios de evaluación; es decir, el mismo número de servidores y arribos simulados. Las figuras 6, 7 y 8 muestran los resultados obtenidos de la probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas cuando el coeficiente de variación del tiempo de servicio de los usuarios secundarios es igual a 2, 5 y 10, respectivamente. Se observa que conforme aumenta el valor del coeficiente de variación, la precisión de los valores numéricos de las métricas de desempeño obtenidos con la que las distribuciones hiper-exponenciales de orden bajo (i.e.  $n=2$ ) para aproximar la distribución log-normal se deteriora. Esto se debe a que, cuando aumenta el coeficiente de variación, los valores del tiempo de servicio se alejan del valor medio provocando que la pendiente con la que cae la función de distribución acumulativa (CDF) de la distribución normal sea más lenta. Esto trae como consecuencia que se requiera una hiper-exponencial de mayor orden para mejorar la aproximación ya que de esta forma se tiene un mayor número de parámetros de control con los que es posible lograr un coeficiente de variación más grande.

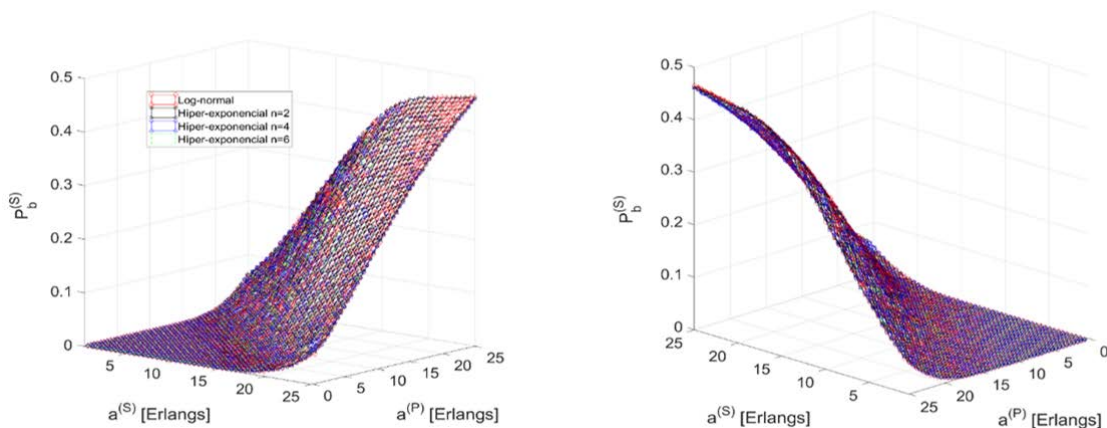


Figura 6 Probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 2 y sus aproximaciones con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

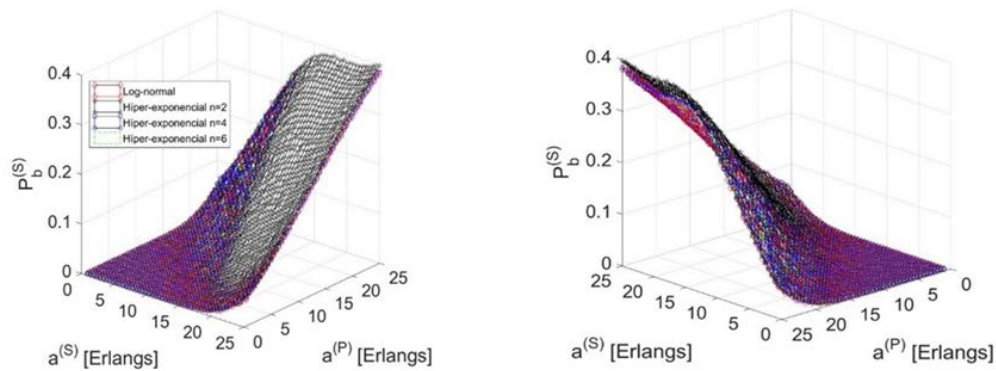


Figura 7 Probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 5 y sus aproximaciones con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

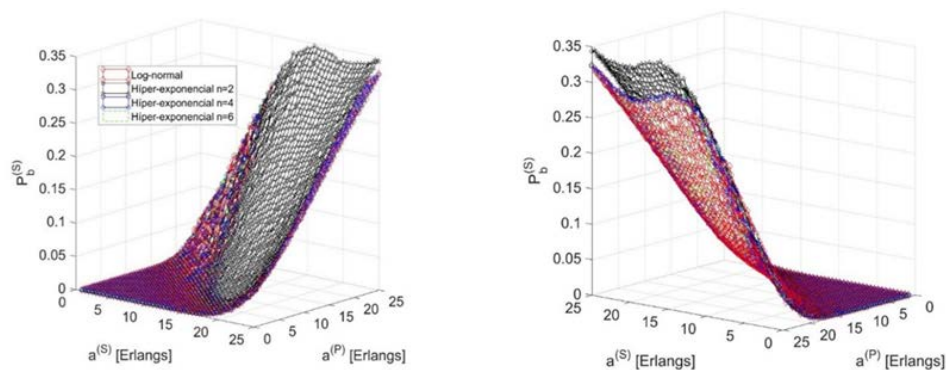


Figura 8 Probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 10 y sus aproximaciones con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

De manera análoga se graficaron las probabilidades de terminación forzada. Los casos cuando el coeficiente de variación del tiempo de servicio de los usuarios secundarios es igual a 2, 5 y 10, se muestran en las figuras 9, 10 y 11, respectivamente. De las figuras 9, 10 y 11 se observa que, la probabilidad de terminación forzada es una función monótonicamente creciente del tráfico ofrecido primario y secundario. La precisión de los valores numéricos de esta métrica de desempeño también es sensible al valor del coeficiente de variación y al orden de la distribución hiper-exponencial empleada. Esto es que, a mayor coeficiente de variación de la distribución log-normal se requiere de un mayor número de parámetros de control de la distribución hiper-exponencial para mejorar la precisión de los valores numéricos de la probabilidad de terminación forzada.

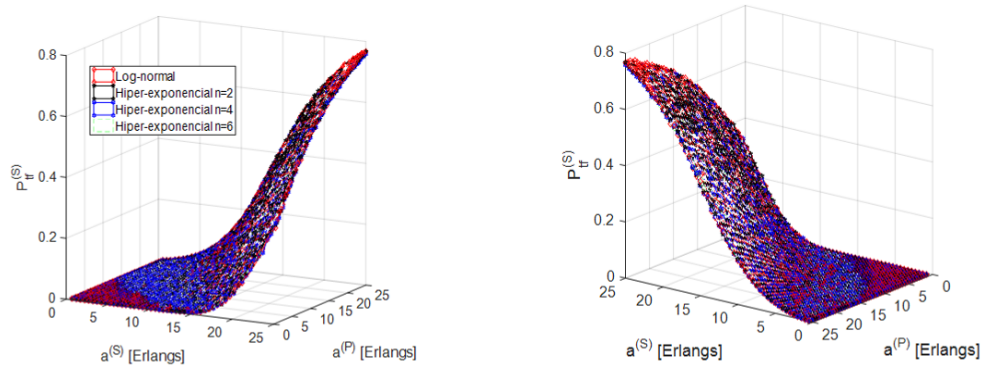


Figura 9 Probabilidad de terminación forzada de llamada considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 2 y sus aproximaciones correspondientes con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

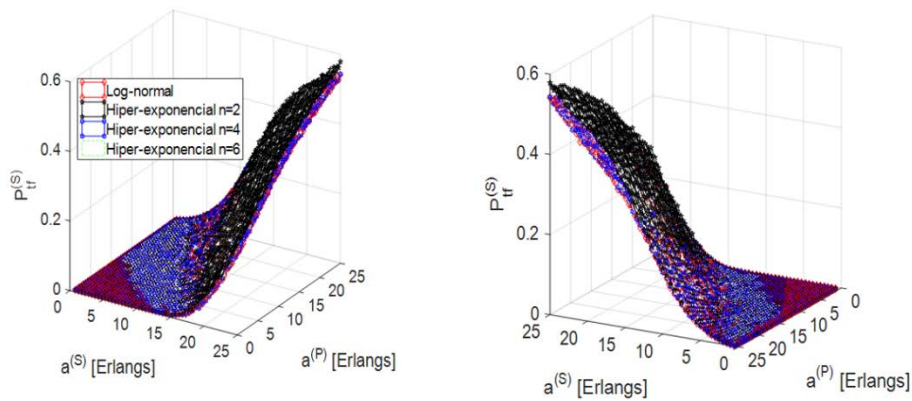


Figura 10 Probabilidad de terminación forzada de llamada considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 5 y sus aproximaciones correspondientes con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

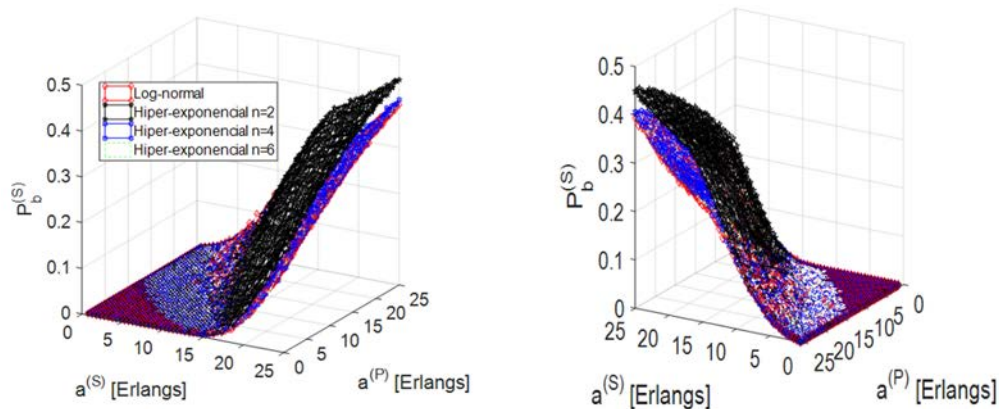


Figura 11 Probabilidad de terminación forzada de llamada considerando tiempo de servicio de los usuarios secundarios con distribuciones log-normal con coeficiente de variación 10 y sus aproximaciones correspondientes con distribuciones hiper-exponenciales de orden 2, 4 y 6.

Para cuantificar la precisión en los valores numéricos de las métricas de desempeño obtenidos con las aproximaciones de la distribución de probabilidad log-normal por medio de distribuciones hiper-exponenciales, se calculó la diferencia porcentual entre los valores numéricos de las métricas de desempeño obtenidos considerando una y otra distribución. Esta diferencia porcentual se calcula con ecuación 3.

$$Pct = \left( \frac{P_{Log-normal} - P_{hiper-exponencial n}}{P_{Log-normal}} \right) \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- $P_{Log-normal}$  representa el valor de la métrica de desempeño ( $P_b^{(S)}$  o  $P_{tf}^{(S)}$ ) obtenida considerando que la distribución de probabilidad del tiempo de servicio de los usuarios secundarios es log-normal; y
- $P_{hiper-exponencial n}$  representa el valor de la métrica de desempeño ( $P_b^{(S)}$  o  $P_{tf}^{(S)}$ ) obtenida considerando que la distribución probabilidad del tiempo de servicio de los usuarios secundarios es hiper-exponencial de orden  $n$ .

Las figuras 12 y 13 muestran el valor de la diferencia porcentual de la probabilidad de bloqueo de llamadas nuevas en función de los tráficos ofrecidos de ambos tipos de usuarios con distribución hiper-exponencial de orden 2 y 6, respectivamente; en ambas figuras se utilizó un coeficiente de variación igual a 10.

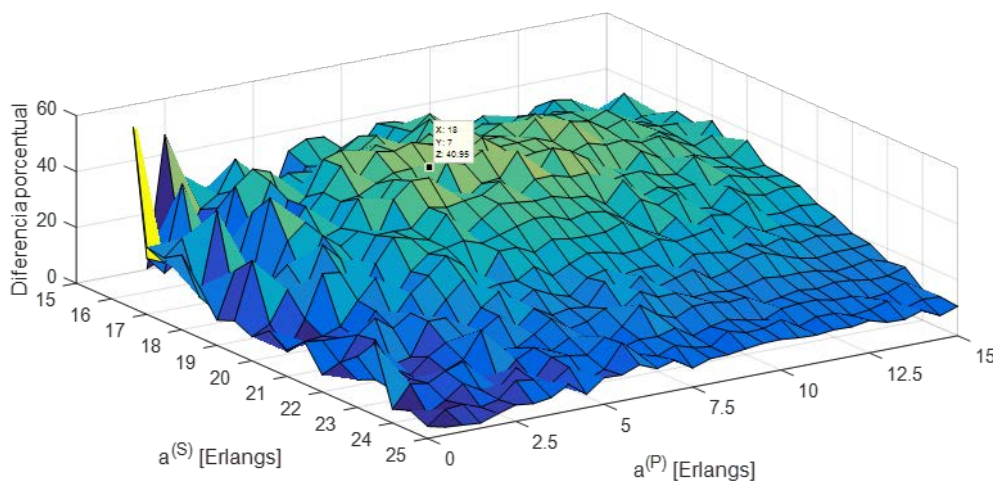


Figura 12 Diferencia porcentual entre la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios obtenida considerando tiempo de servicio con distribuciones log-normal e hiper-exponencial de orden 2.

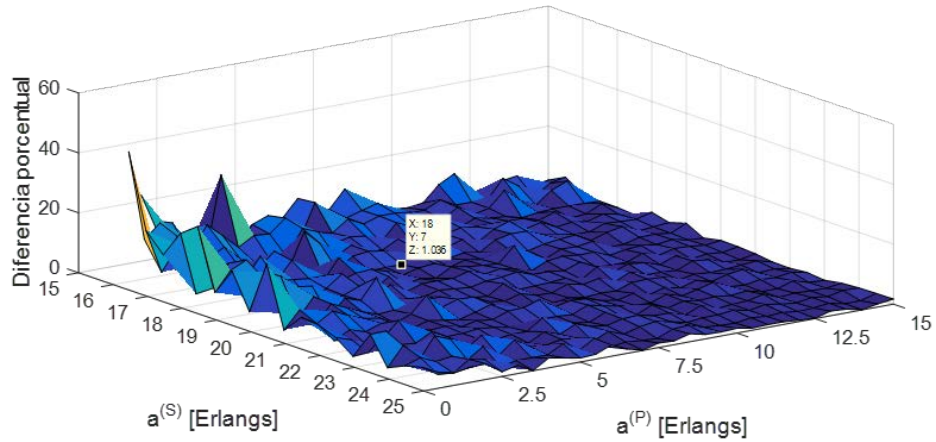


Figura 13 Diferencia porcentual entre la probabilidad de bloqueo de usuarios secundarios obtenida considerando tiempo de servicio con distribuciones log-normal e hiper-exponencial de orden 6.

Las figuras 12 y 13 muestran que, para un tráfico ofrecido primario y secundario igual a 7 y 18 Erlangs, respectivamente, existe una disminución del 39.9% en la diferencia porcentual entre el valor de la probabilidad de bloqueo cuando se emplea una distribución hiper-exponencial de orden 2 y de orden 6 para aproximar la distribución log-normal. De la misma forma se realizó el cálculo de la diferencia porcentual para la probabilidad de terminación forzada de llamada. Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 14 y 15. Al igual que para la probabilidad de bloqueo de llamada nueva, se observa que la diferencia porcentual decrece conforme aumenta el orden de la distribución hiper-exponencial.

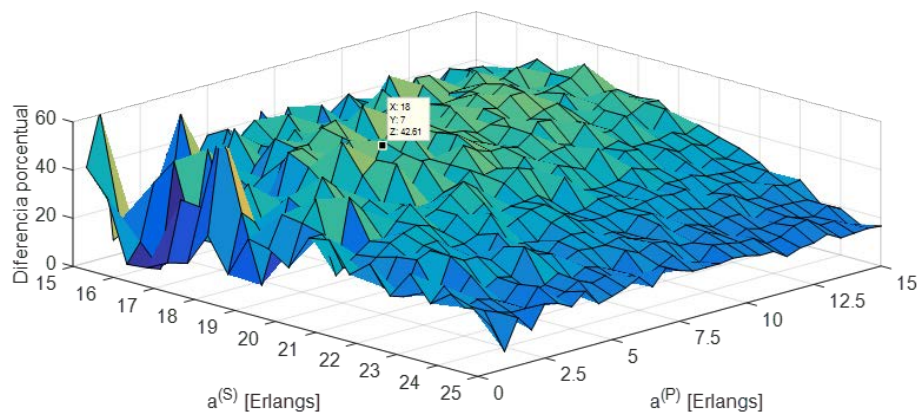


Figura 14 Diferencia porcentual entre la probabilidad de terminación forzada de llamada obtenida considerando tiempo de servicio con distribuciones log-normal e hiper-exponencial de orden 2.

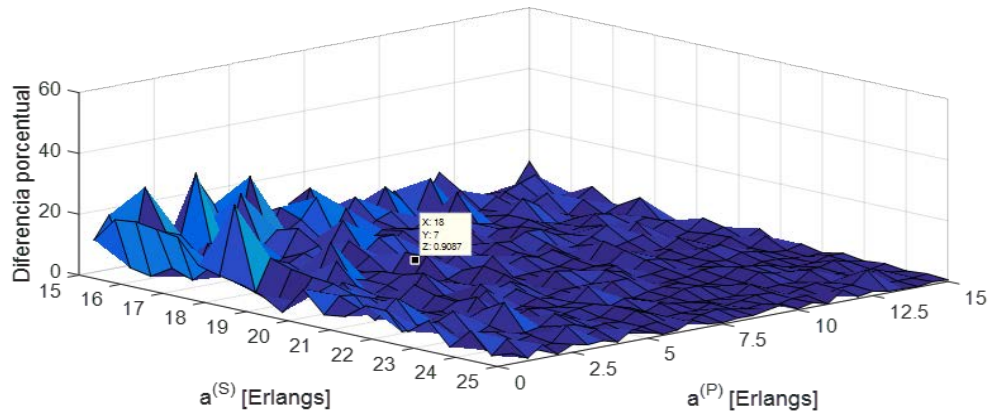


Figura 15 Diferencia porcentual entre la probabilidad de terminación forzada de llamada obtenida considerando tiempo de servicio con distribuciones log-normal e hiper-exponencial de orden 6.

#### 4. Discusión

De los resultados mostrados en la sección anterior se pueden destacar algunas observaciones. Conforme se incrementa el valor del coeficiente de variación de la distribución log-normal que representa al tiempo de servicio de los usuarios secundarios, es necesario aumentar el orden de la distribución hiper-exponencial para mejorar la precisión de la aproximación. Por ejemplo, para valores pequeños del coeficiente de variación ( $CoV = 2$ ), se observa que basta con un orden pequeño de la distribución hiper-exponencial para obtener una aproximación aceptable con respecto al comportamiento de las métricas de desempeño. Además, al aumentar el valor del coeficiente de variación, las métricas de desempeño tienen una mayor dependencia al tráfico de los usuarios secundarios. Lo anterior se debe a que el tiempo de servicio de usuarios primarios se caracteriza con la distribución exponencial negativa para todos los casos.

Los resultados obtenidos son de utilidad para futuros trabajos en los que se pretende desarrollar modelos matemáticos para el análisis basado en cadenas de Markov de sistemas cognitivos.

#### 5. Conclusiones

Se evaluó el desempeño de un sistema de radio cognitivo mediante simulaciones de eventos discretos por computadora. Se consideraron diferentes distribuciones de

probabilidad del tiempo de servicio de los usuarios secundarios. El desempeño del sistema se evaluó en términos de la probabilidad de bloqueo de llamada nueva y la probabilidad de terminación forzada de llamada. Se hizo énfasis en comparar el comportamiento de estas métricas obtenidas utilizando la distribución log-normal y sus aproximaciones con distribuciones hiper-exponenciales de diferente orden. De los resultados obtenidos se observa que las aproximaciones con distribución hiper-exponencial mejoran su precisión conforme aumenta el orden de la misma. Sin embargo, a mayor valor del coeficiente de variación de la distribución que se busca aproximar, se necesita un orden mayor de la distribución hiper-exponencial para obtener una precisión similar. Los resultados numéricos obtenidos en una diversidad de escenarios de evaluación muestran que la distribución hiper-exponencial puede sustituir a la distribución log-normal para la caracterización del tiempo de servicio de los usuarios secundarios, ya que se obtienen valores numéricos similares de las métricas de desempeño del sistema. Con esto se busca facilitar los análisis matemáticos de este tipo de sistemas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Abate J., Choudhury G. L. and Whitt W. Waiting-time tail probabilities in queues with long-tail service-time distributions. *Queueing Systems*, vol. 16, no. 3-4, 311-338, 1994.
- [2] Aguilar-Rentería J. H. and Navarro-Cadavid A. Radio cognitiva - Estado del arte. *Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 16, 31-53, 2011.
- [3] Asmussen S., Nerman O. and Olson M. Fitting Phase-Type Distributions via the EM Algorithm. *Scandinavian Journal of Statistics*, vol. 23, no. 4, 419-441, 1996.
- [4] Bolotin V. A. Modeling call holding time distributions for CCS network design and performance analysis. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 3, 433-438, 1994.
- [5] Filin S., Harada H., Murakami H. and Ishizu K. International Standardization of Cognitive Radio Systems. *IEEE Communications Magazine*, 82-89, 2011.
- [6] Orlik P. V. and Rappaport S. A model for tele-traffic performance and channel holding time characterization in wireless cellular communication with general



- session and dwell time distributions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 16, no. 5, 788-803, 1998.
- [7] Saleem Y. and Rehmani M.-H. Primary radio user activity models for cognitive radio networks: A survey. ELSEVIER Journal of Network and Computer Applications, vol. 43, pp.1-16, 2014.
- [8] Serrano-Chavez, et al. Approximating Log-Normally Distributed Secondary Service Time by Hyper-Exponential Distribution for the Analytical Performance Evaluation of Cognitive Radio Networks. The 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC2017), pp. 641-645, 2017.
- [9] Shanidul H. and Wasim A. Performance analysis of cognitive radio networks with generalized call holding time distribution of secondary users. Telecommunication Systems, vol. 66, no. 1, 95-108, 2017.
- [10] Wang X. and Fan P. Channel Holding Time in Wireless Cellular Communications with General Distributed Session Time and Dwell Time. IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 2, 158-160, 2007.
- [11] Zhang Y. Dynamic spectrum Access in cognitive radio wireless networks. IEEE International Conference on Communications. Beijing, China. May, 2008.
- [12] Zhu X., Shen L. and Yum T-S. P. Analysis of cognitive radio spectrum Access with optimal channel reservation. IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 4, 1-3, 2007.

# **APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL ARTIFICIAL PARA LA CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE TUI TS EN ESPAÑOL**

*ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLICATION FOR AUTOMATIC  
CLASSIFICATION OF TWEETS IN SPANISH*

**Andrea Gidalti García Pérez**

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*a2173018004@alumnos.uat.edu.mx*

**Ana Bertha Ríos Alvarado**

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*arios@docentes.uat.edu.mx*

**Edgar Tello Leal**

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*etello@docentes.uat.edu.mx*

**José Hugo Barrón Zambrano**

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*hbarron@docentes.uat.edu.mx*

**Alan Díaz Manríquez**

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*amanriquez@docentes.uat.edu.mx*

## **Resumen**

Las plataformas sociales como Twitter se han convertido en formas muy populares de transmitir información. Los usuarios de Twitter crean y usan *hashtags* en sus tuits para categorizarlos de acuerdo a un tema y dar su opinión al respecto, permitiendo crear tendencias mediante *hashtags*, así como agrupar y vincular la información con otros usuarios a través de búsquedas. En este trabajo se propone un modelo de clasificación de tuits en español para tres clases: 1) Situación de riesgo (SDR), 2) Servicio de agua y 3) Política, mediante la implementación de una red neuronal de tipo perceptrón multicapa. Para la recolección de tuits se han utilizado las etiquetas o palabras clave que representan los temas mencionados. Adicionalmente, se implementó un modelo de clasificación bayesiano para evaluar

y comparar su desempeño mediante validación cruzada de k grupos. Los resultados muestran que la red neuronal presenta mejor exactitud en la clasificación de tuits en español.

**Palabras Claves:** Clasificación de texto, red neuronal artificial, tuits.

## **Abstract**

*Social platforms like Twitter have become very popular ways of transmitting information. Twitter users create and use hashtags in their tweets to categorize them according to a topic and give their opinions about it, allowing to create trends through hashtags, as well as grouping and linking the information with other users through searches. In this paper we propose a classification model for Twitter publications in Spanish about three classes: 1) Risk situation, 2) Water service and 3) Politics through the implementation of a multilayer perceptron, a type of artificial neural network. For collecting tweets, the hashtags or keywords that represents mentioned topics were used. Additionally, a classification model based on the Bayes theorem was implemented to evaluate and compare its performance by k-fold cross-validation. The results show that the neural network presents better accuracy in the classification of Spanish tweets.*

**Keywords:** Artificial neural network, text classification, tweets.

## **1. Introducción**

Las redes sociales se han vuelto un medio imprescindible para compartir y consultar información de temas de interés en tiempo real. De acuerdo con un estudio realizado en 2017 por la Asociación Mexicana de Internet<sup>1</sup> sobre los hábitos de los usuarios de Internet en México, se reporta que la principal actividad en línea es el acceso a redes sociales. En particular, a través de redes sociales se accede a información relacionada con los actores políticos y sus propuestas, así como información de eventos de interés social como el acceso a servicios públicos y de seguridad. Twitter<sup>2</sup> es una de las redes sociales con mayor actividad entre los

---

<sup>1</sup> <http://www.asociaciondeinternet.mx>

<sup>2</sup> <https://twitter.com>

usuarios de Internet, pero aún no hay soluciones contundentes para la verificación de cuentas de usuarios que se apeguen a los lineamientos de legitimidad y legalidad. En consecuencia, es posible publicar información ambigua o errónea acompañada de las etiquetas comunes llamadas *hashtags* (por ejemplo, #política, #SDR). En temas como seguridad esto deriva en falsas alarmas e incertidumbre entre la sociedad. En este documento se propone una aplicación que verifique el tema en tuits con la cual se pueda tener una certeza de que el tuit está asociado al tema de la etiqueta (*hashtag*) que contiene ese tuit.

Entre las técnicas de aprendizaje automático que se han usado para el tratamiento de tuits están las Redes Neuronales Artificiales (RNA). Las RNA son una técnica que ha generado gran interés desde su aparición debido a que pueden ser aplicadas para resolver problemas relacionados con las tareas de clasificación, reconocimiento de imágenes, reconocimiento de patrones, reconocimiento de voz, entre otras [Haykin, 1998] [Cheng, 1994]. Para el tratamiento de tuits, debido al gran volumen de información que se genera en cada momento, las redes neuronales han sido usadas en tareas como análisis de sentimientos [Duncan, 2015], [Jianqiang, 2018], [Rosenthal, 2017] y se han presentado estudios que abordan la diversidad en técnicas y herramientas de acceso a los tuits [Rosá, 2017], [Pla, 2013]. Otro de los intereses entre la comunidad ha sido la detección del lenguaje de los tuits [Wehrmann, 2018], y la identificación del perfil del autor [Shrestha, 2017], su género, edad, entre otras características [Martinc, 2017], [Rangel, 2013]. En algunos casos se han enfocado en el análisis de tuits de un tema en particular como en el dominio del cuidado de la salud [Kuang, 2017] donde se hace una clasificación sobre si un tuit está relacionado o no con ese tema. Una de las ventajas de usar una RNA como modelo de clasificación es que ha mostrado buenos resultados en la clasificación multiclase.

En este trabajo se implementa una RNA como modelo de clasificación para asignar una clase a un tuit, se ha considerado como caso de estudio una muestra de las publicaciones de los temas: 1) SDR, 2) Servicio de agua y 3) Política.

Dicho tuit puede contener alguna palabra clave, palabra relacionada o un *hashtag*. Las cuentas de donde se han recolectado los tuits pertenecen a usuarios con

cuentas habilitadas en el estado de Tamaulipas, México. Además, se ha construido una aplicación web que permite la clasificación automática de un tuit escrito por un usuario común.

En este trabajo se utiliza un perceptrón multicapa como clasificador principal, además, dicho modelo es comparado con un clasificador bayesiano ingenuo. Los modelos mencionados tienen algunas características que los diferencian, los clasificadores bayesianos son conocidos por tener un buen desempeño con conjuntos pequeños de datos, son más sencillos de comprender e implementar, es por eso que son populares y en muchas ocasiones son utilizados para medir el desempeño de otros clasificadores (como en este caso). Por otra parte, las redes neuronales debido a su complejidad se adaptan muy bien a conjuntos grandes y son utilizadas para una amplia variedad de tareas, además de tener la capacidad de modelar problemas no lineales y complejos, realizar inferencias a partir de la información proporcionada y trabajar sin importar la distribución de los datos. Una de las principales razones por la que se seleccionó una RNA como modelo principal para clasificación de tuits, es que presta gran atención a la correlación entre variables, en este caso el vocabulario de los tuits, a diferencia del clasificador bayesiano, en el que las variables son tratadas de manera independiente. Ambas técnicas fueron evaluadas mediante la estrategia de validación cruzada de  $k$  grupos, con  $k = 10$ , calculando exactitud y error promedio para los  $k$  grupos y promedio de precisión, exhaustividad y medida  $F$  para cada iteración.

## **2. Métodos**

El método propuesto se divide en cinco etapas, dentro de las cuales se recuperan los tuits y, se implementan y se evalúan dos clasificadores. Además, se presenta una aplicación web con la que es posible asignar el tema o clase al tuit según el entrenamiento y predicción del clasificador seleccionado.

### **Recuperación de tuits**

Los métodos de aprendizaje supervisado, como la clasificación, requieren dos conjuntos de datos, un conjunto de datos para la etapa de entrenamiento y otro

para la etapa de pruebas. En este caso, los datos son tuits, textos cortos de máximo 280 caracteres. Para conformar el conjunto de datos se recuperaron tuits de tres clases distintas en un periodo de abril a mayo del 2018. Las clases o temas corresponden a sucesos de interés en el estado de Tamaulipas, por lo tanto, los tuits fueron filtrados con las palabras clave o *hashtags*: #Tamaulipas, Tamaulipas, #Tamps o Tamps; y para cada clase las siguientes palabras clave:

- Situación de riesgo (SDR):
  - ✓ #SDR, #SituaciónDeRiesgo, #SituacionDeRiesgo, #SituacionRiesgo, #SituaciónRiesgo.
  - ✓ #Victoria, #CdVictoria, #Reynosa, #Matamoros, #NuevoLaredo, #Tampico, #Madero, #CdMadero, #Altamira, #RíoBravo, #RioBravo o #Mante.
- Servicio de agua:
  - ✓ Falta de agua, no hay agua, problema del agua, sin agua, fuga o suministro de agua.
- Política
  - ✓ #Elecciones, Elecciones, #Politica, #Política, Politica, Política, votar, votos, eleccion o elección.

Para el caso de la clase SDR se consideraron las tendencias más comunes para identificar una situación de riesgo, aunque se consideró todo lo etiquetado como #Tamaulipas también se agregaron algunos nombres de los municipios con mayor índice de SDR, esto para el caso de que el tuit no tuviera una de las etiquetas del nombre del estado. Además, al recuperar los tuits se tomaron en cuenta solamente aquellas publicaciones originales, es decir, se eliminaron los retuits, obteniendo 1,399 tuits, distribuidos por clase según las cantidades mostradas en la tabla 1.

Tabla 1 Tuits recuperados por clase.

Clase	Tuits
SDR	157
Servicio de agua	231
Política	1,011

En los tuits recuperados se observa una alta presencia de la clase Política dada la cercanía de elecciones presidenciales respecto al periodo de recuperación. Además, el caso del servicio de agua y situaciones de riesgo son problemas que afectan a varios municipios del estado de manera simultánea.

## **Pre-procesamiento**

En Twitter, las publicaciones presentan variabilidad debido al tipo de usuario (persona o institución), género, edad, grado de estudio o trabajo, intereses, lugar de residencia, el tema o tendencia de la que se esté publicando y el vocabulario particular de dichos temas. Por esto, el procesamiento inicial o tratamiento de los tuits es una de las etapas más importantes para lograr que un modelo de clasificación esté bien entrenado.

En nuestro caso el pre-procesamiento se dividió en dos etapas:

- Etapa de limpieza de los tuits: los tuits tienen características muy diferentes a otras fuentes de información, como textos extraídos de páginas web o de conjuntos de datos diseñados específicamente para la clasificación, por esto, en la etapa de limpieza se realizó lo siguiente:
  - ✓ Eliminar URLs a otros sitios web.
  - ✓ Eliminar referencias a usuarios (@usuario).
  - ✓ Eliminar tendencias tomadas en cuenta para la recuperación (#tendencia).
  - ✓ Eliminar emoticones/emojis.
  - ✓ Eliminar caracteres especiales (¿, ¡, \*, {}, entre otros).
- Etapa de eliminación de palabras vacías<sup>3</sup> y reducción de palabras: Existen listas de palabras vacías para cada idioma, las cuales pueden ser modificadas para adaptarse a las necesidades del usuario o aplicación. En este caso se utilizó una lista de palabras definida para el idioma español, a la cual se le agregaron algunos de los modismos detectados y/o abreviaturas comúnmente usadas, consideradas como faltas de ortografía (ke, k, x (por), + (más), entre otras):

---

<sup>3</sup> Una palabra vacía es aquella que carece de significado por sí sola, generalmente son artículos, preposiciones, conjunciones, entre otras.

- ✓ Reducción de palabras a su raíz léxica: al tratarse de texto en español se trabajó con una herramienta que trata este lenguaje, por lo que se utilizó la implementación del algoritmo Snowball incluida en la librería NLTK (*Natural Language Tool Kit*) para Python. Este algoritmo reduce las palabras a su raíz léxica, por ejemplo, para las palabras azulado, azules, azuloso y azular, su raíz léxica es azul.

### **Construcción del conjunto de datos**

Una vez que los tuits recuperados fueron pre-procesados, se etiquetaron con las tres categorías disponibles, para esto se hizo primero una revisión manual de los tuits. En el caso de la clase SDR se creó un diccionario de forma manual con los términos más comunes para referirse a estos acontecimientos ya que en ocasiones la cadena #SDR fue utilizada de manera incorrecta. Además de esto, se observó que algunas palabras del vocabulario de las clases SDR y Política se compartían, por lo que los tuits recuperados para Política que pertenecieran a SDR (según el diccionario) fueron etiquetados como correctos para la clase SDR. Posteriormente, para la clase SDR se hizo un etiquetado automático usando como base el diccionario definido, por lo que aquellos tuits en los que no se incluyó una palabra característica, sino que se utilizó sin razón la etiqueta, fueron descartados. En el caso de la clase de Política, después de filtrar aquellos con términos de SDR, los restantes se etiquetaron de manera directa, al igual que en el caso de la clase Servicio de agua.

### **Extracción de características**

Una vez que el conjunto de tuits ha sido etiquetado se procede a realizar la extracción de características, como se muestra en la figura 1. Este proceso da como resultado un modelo que será utilizado para predecir la clase a la que pertenecen los tuits de prueba. Se usará un algoritmo de aprendizaje automático, en este caso se usará una red neuronal de tipo perceptrón multicapa. Para trabajar con una técnica como red neuronal para texto debe generarse una representación vectorial, también conocida como modelo bolsa de palabras [Carrillo, 2002]. En el



modelo bolsa de palabras se toman todos los textos de la colección, en este caso todos los tuits recuperados y se obtiene el vocabulario, es decir todas las palabras que aparecen en el conjunto (sin repetición). Posteriormente, cada tuit se representa como un vector en donde cada palabra tiene una ponderación.



Figura 1 Proceso de extracción de características.

Existen distintas formas de ponderar los términos, la más básica es el modelo booleano que indica la ocurrencia o ausencia de un término del vocabulario en un tuit. En la figura 2, se muestra un ejemplo de este tipo de representación para una colección de tres tuits, donde cada una de las palabras está presente en un tuit, ya sea T1, T2 o T3.

	T1	T2	T3
suspensión	1	0	0
balacera	0	1	0
agua	1	0	0
debate	0	0	1
precaución	0	1	0

Figura 2 Ejemplo del modelo bolsa de palabras.

En nuestro caso, se utiliza la ponderación TF-IDF (ecuación 1), donde se calcula IDF con la ecuación 2. Se utiliza esta ponderación debido a que aporta más información del tuit de manera individual y respecto a su presencia en el conjunto total de tuits. Para obtener la ponderación de cada tuit en el conjunto se utilizaron las herramientas de la librería Scikit-learn de Python, como se describe a continuación:

- Tomar el conjunto de datos y transformarlo a una representación con frecuencia de ocurrencia del término por tuit.

- Posteriormente se transforma a la ponderación *TF-IDF* por término, calculada en este caso con la ecuación 1.

$$TF - IDF(d, t) = TF(t) * IDF(d, t) \quad (1)$$

$$IDF = \log \left[ \frac{1 + n}{1 + DF(d, T)} \right] + 1 \quad (2)$$

Donde:

*TF(t)*: Frecuencia del término

*DF(d, t)*: Frecuencia de término en la colección

*n*: número total de documentos

Utilizar *TF - DF* permite que se reduzca el impacto de términos que ocurren con mucha frecuencia en el conjunto de tuits, ya que estos son menos representativos para la extracción de características.

### Configuración y entrenamiento del clasificador

El clasificador principal de esta propuesta es un perceptrón multicapa, además, se compara su desempeño con un clasificador bayesiano, en ambos casos se utilizó la implementación disponible en la librería Scikit-learn de Python.

El perceptrón multicapa es una de las RNA más utilizadas, se caracteriza porque en su estructura se distinguen tres tipos de capas. La capa de entrada, en la que se reciben las variables de entrada y se traspasan a la o las capas ocultas, en estas últimas se concentra el procesamiento, sus entradas corresponden a salidas de capas anteriores y sus salidas se utilizan para el procesamiento de capas posteriores, y por último la capa de salida la cual se encarga de proporcionar la salida de la red (figura 3).

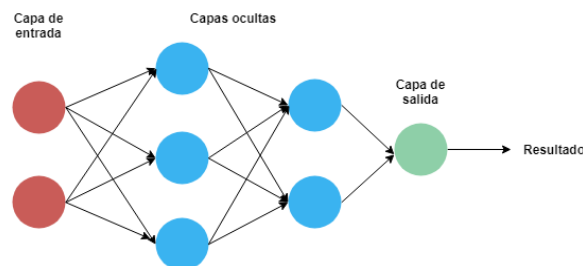


Figura 3 Estructura de un perceptrón multicapa.

Cada una de estas capas está formada por una o más neuronas con conexiones entrantes de capas anteriores y conexiones salientes a capas posteriores, con lo que es posible resolver problemas que no son linealmente separables por un solo plano, es decir, por un perceptrón simple.

La configuración de los parámetros para el perceptrón multicapa fue la siguiente:

- *tol* = 0.0001: este valor determina el umbral de error con el cual se detendrá la actualización de los pesos de la red.
- *learning\_rate\_init* = 0.001: indica la velocidad de aprendizaje.
- *max\_iter* = 10000000: máximo número de iteraciones en las que se detendrá el entrenamiento si no se consigue llegar a un error menos al umbral definido.
- *hidden\_layer\_sizes* = (150,50): con cada valor se indica una capa oculta, por lo que se tienen dos capas ocultas, la primera con 150 neuronas y la segunda con 50.
- *activation* = 'relu': función de activación.
- *solver* = 'adam': optimizador.

Se realizaron pruebas con distintos valores para los parámetros, al disminuir el valor de tolerancia se obtuvieron más errores en muchas de las pruebas y al cambiar la cantidad de neuronas no se observaron cambios considerables. Respecto a la función de activación se entrenó el clasificador con la función tangente, sin embargo, se detectaron más tuits etiquetados de manera incorrecta por lo que se optó por usar la función por defecto. Debido a que el tamaño del conjunto puede cambiar al recuperar más tuits se eligieron los parámetros presentados previamente ya que el modelo generado fue estable.

En el caso del clasificador bayesiano ingenuo, que es de tipo probabilístico y está basado en el Teorema de Bayes (ecuación 3) propuesto por Thomas Bayes.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)} \quad (3)$$

Donde:

$P(A|B)$  Indica la probabilidad de A dado que B es verdadero.

- $P(B|A)$  Probabilidad de ocurrencia del evento B dado que A es verdadero.  
 $P(A)$  Probabilidad del suceso A.  
 $P(B)$  Probabilidad del suceso B.

El teorema de Thomas Bayes permite inferir la probabilidad de un suceso con base en la probabilidad o conocimiento que se tiene de sucesos conocidos, se usa también una representación del texto en bolsa de palabras.

En la distribución multinomial las frecuencias de términos u otra ponderación se representan con el modelo bolsa de palabras en donde los documentos en cada clase son modelados como muestras extraídas de una distribución de palabras multinomial, por lo que la probabilidad de que un documento pertenezca a una clase está dada por la probabilidad de cada palabra que se conoce que pertenece a dicha clase [Aggarwal, 2012].

En este clasificador se trabajó con los valores por defecto que asigna la librería Scikit-learn, ya que al probar varias combinaciones estos dieron los mejores resultados. Entre algunos de los parámetros que es posible configurar es  $\alpha = 1.0$ , el cual hace referencia al suavizado de Laplace, que se usa principalmente para evitar multiplicar las probabilidades por cero, con este suavizado las probabilidades son inicializadas de manera uniforme, posteriormente son modificadas con los datos por clasificar, es decir que inicialmente un elemento tiene la misma probabilidad de pertenecer a cualquier clase.

Una vez entrenado el clasificador, se realizan las pruebas, es decir, se recibe un tuit sin clasificar el cual pasa por una etapa de extracción de características y posteriormente se hace la consulta al clasificador para obtener su etiqueta o clase. Este proceso se muestra en la figura 4.



Figura 4 Proceso de predicción para los tuits de prueba.

### 3. Resultados

Para evaluar el desempeño de los clasificadores, el conjunto de tuits recuperados fue dividido por medio de la técnica de validación cruzada de  $k$  grupos, en este tipo de validación cruzada se realizan  $k$  iteraciones y los datos se dividen en  $k$  subconjuntos, en cada iteración una parte del conjunto se utiliza como datos de prueba y el resto como datos de entrenamiento ( $k - 1$ ), el proceso de validación se repite la cantidad de veces definida por  $k$  con cada uno de los conjuntos generados.

Para calcular el error de los distintos conjuntos se calcula la media aritmética de los errores de cada iteración y se obtiene un único resultado, esto se hace de la misma manera con el valor de la exactitud [Wong, 2017].

Para estos experimentos se tomó  $k = 10$ , por lo que en cada iteración se asignó el 90% de los tuits para el entrenamiento y 10% para las pruebas, en las tablas 2 y 3 se presentan los resultados de precisión, exhaustividad y medida  $F$  para cada clase en una ejecución. Además, en la tabla 4 se presenta la exactitud y error promedio de la misma ejecución.

Tabla 2 Promedio de precisión, exhaustividad y medida F.

Clase	Precisión	Exhaustividad	Medida F
Política	0.824	1.000	0.903
SDR	1.000	0.304	0.459
Servicio de agua	0.952	0.513	0.658

Tabla 3 Promedio de precisión, exhaustividad y medida F.

Clase	Precisión	Exhaustividad	Medida F
Política	0.917	0.990	0.952
SDR	0.914	0.645	0.752
Servicio de agua	0.951	0.812	0.875

Tabla 4 Exactitud y error promedio.

Clasificador	Exactitud	Error
Bayesiano ingenuo	0.841	0.158
Perceptrón multicapa	0.921	0.078

Se ejecutaron múltiples iteraciones, y se comprobó que el perceptrón multicapa se mantuvo con mejores resultados que el clasificador bayesiano. En la tabla 5 se presentan los resultados de exactitud y error para la validación cruzada de 10 grupos en 10 iteraciones, como se observa, en todos los casos el perceptrón multicapa tiene mayor exactitud y menor error.

Tabla 5 Exactitud y error promedio por ejecución para los clasificadores.

Ejecución	Clasificador Bayesiano		Red Neuronal	
	Exactitud	Error	Exactitud	Error
1	0.842	0.157	0.917	0.082
2	0.842	0.157	0.915	0.084
3	0.841	0.158	0.922	0.077
4	0.841	0.158	0.919	0.080
5	0.848	0.151	0.920	0.079
6	0.842	0.157	0.919	0.080
7	0.843	0.156	0.914	0.085
8	0.841	0.158	0.917	0.082
9	0.842	0.157	0.915	0.084
10	0.836	0.163	0.917	0.082

### Aplicación web

Para que el clasificador generado pudiera ser utilizado por un usuario final y así éste pudiera comprobar si un tuit pertenece o no a los temas de SDR, Política o Servicio de agua, se diseñó una aplicación web con las siguientes funcionalidades:

- **Vista principal:** en la figura 5 se muestra la interfaz en la que el usuario puede escribir un tuit, seleccionar el clasificador entre los dos disponibles y obtener la categoría a la que pertenece.



Figura 5 Vista principal de la interfaz para usar el clasificador.

- **Cargar tuit:** si el usuario no conoce el vocabulario o tuits de las clases disponibles puede cargar uno del conjunto de manera aleatoria para ver cómo funciona el clasificador, como se presenta en la figura 6.



Figura 6 Botón para cargar tuit aleatorio.

- **Obtener la categoría:** en la figura 7 se visualiza la categoría a la que un tuit pertenece una vez que ha sido ingresado y se ha seleccionado un clasificador.



Figura 7 Categoría asignada por el clasificador.

- **Retroalimentación:** el usuario tiene la opción de agregar nuevos tuits y su clasificación manual directamente al conjunto de datos con el objetivo de que estos sean incluidos en el modelo. En este caso, el modelo deberá ser reentrenado para que incluya el tuit y la clase asignada por el usuario, esto se realiza mediante la interfaz de la figura 8.

**REENTRENAMIENTO**

Si lo desea puede agregar más tuits de las clases disponibles antes de realizar el entrenamiento

Nuevo tuit:

Clase:

Seleccionar...▼

Figura 8 Vista para agregar tuits al modelo.

## 4. Discusión

La tarea de clasificación se encuentra presente en muchas actividades, tal es el caso de la clasificación de texto, en donde el desempeño de los modelos de clasificación depende en gran parte de la calidad de los datos con los que se esté trabajando, ya que si se trata de un conjunto artificial se espera que se encuentren correctamente etiquetados, a diferencia de un conjunto de datos construido con datos reales y etiquetado manualmente, que podría tener algunos errores por las técnicas de etiquetado que se hayan usado.

Además de lo anterior, es muy importante la manera en la que los datos son tratados, ya que la selección de técnicas de pre-procesamiento cambiará las características obtenidas durante la extracción y por lo tanto el proceso de entrenamiento y el valor de la exactitud en los resultados.

Respecto al desempeño de los clasificadores, RNA obtuvo valores de error menores que 0.09, a diferencia del clasificador bayesiano, que obtuvo valores superiores a 0.15. Lo anterior indica que para RNA la mayoría de los tuits de prueba fueron etiquetados correctamente en las 10 ejecuciones realizadas, esto se debe en gran parte a la manera en la que trabaja RNA respecto a la correlación entre variables, permitiendo que se mantenga esa relación entre palabras que forman frases características de una clase u otra, con lo que se mantiene el contexto del tuit y aumenta la exactitud del clasificador. Se espera que al reunir una mayor cantidad de tuits la exactitud de los modelos aumente, sin embargo, esto requiere un periodo más amplio de recolección de tuits y, en consecuencia, un mayor tiempo de entrenamiento de los modelos.



A través de la aplicación web propuesta es posible que los usuarios comunes participen e interactúen de una forma más fácil con el etiquetado y pruebas de los clasificadores automáticos.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se ha presentado un enfoque de clasificación de tuits en múltiples clases, incluyendo todos los aspectos a considerar para su recolección, procesamiento y pruebas. En particular, procesar texto en español representa un reto por la diversidad de léxico y el tipo de usuario que escribe los tuits. En este caso para la adquisición de los tuits y el pre-procesamiento solo se consideraron palabras asociadas a los temas de interés, sin embargo, pueden asociarse otras características de los usuarios para poder clasificar otros temas.

Se ha evaluado el desempeño de un perceptrón multicapa como clasificador respecto a un clasificador probabilístico como el clasificador Bayesiano ingenuo y, ambos clasificadores fueron evaluados con el método de validación cruzada de 10 grupos. A partir de esto se observó que para ambos clasificadores se obtuvieron buenos resultados, siendo la red neuronal la que alcanzó los valores más altos con resultados superiores a 0.90 de exactitud promedio. Sin embargo, el clasificador Bayesiano no podría ser descartado ya que su exactitud promedio superó el 0.80 en todas las pruebas realizadas.

Es importante resaltar que la metodología propuesta puede trabajar con un número de clases superior o inferior y también con distintos contextos, solo deberá modificarse el vocabulario particular en la etapa de recolección de tuits.

Este trabajo ha sido financiado por la beca 27194 del proyecto de Investigación de Ciencia Básica SEP-CONACYT CB\_2015/256922.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Aggarwal C, Zhai C. 2012. A Survey of Text Classification Algorithms. *Min. Text Data*: 163–222.
- [2] Cheng B, Titterington DM. 1994. Neural Networks: A Review from a Statistical Perspective. *Stat. Sci.* 9: 2–30.

- [3] Duncan B, Zhang Y. 2015. Neural networks for sentiment analysis on Twitter. 2015 IEEE 14th Int. Conf. Cogn. Informatics Cogn. Comput.: 275–278.
- [4] Haykin S. 1998. Neural networks: A Comprehensive Foundation, 2nde. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR. S0269888998214044 p.
- [5] Jianqiang Z, Xiaolin G. 2018. Deep Convolution Neural Networks for Twitter Sentiment Analysis. IEEE Access 3536.
- [6] Kuang S, Davison B. 2017. Learning Word Embeddings with Chi-Square Weights for Healthcare Tweet Classification. Appl. Sci. 7: 846.
- [7] Carrillo Ruiz, M., López López, A. Una Representación Vectorial para Contenido de Textos en Tratamiento de Información, Servidor y biblioteca de modelos de recuperacion de informacion, 2002.
- [8] Martinc M, Škrjanec I, Zupan K, Pollak S. 2017. PAN 2017: Author profiling - Gender and language variety prediction: Notebook for PAN at CLEF 2017. CEUR Workshop Proc. 1866.
- [9] Pla F, Hurtado L-F. 2013. TASS-2013: Análisis de Sentimientos en Twitter. Proc. TASS Work. SEPLN 2013: 1–8.
- [10] Rangel F, Rosso P. 2013. Use of Language and Author Profiling: Identification of Gender and Age. Proc. 10th Work. Nat. Lang. Process. Cogn. Sci.: 177.
- [11] Rosá A, Chiruzzo L, Etcheverry M, Castro S. 2017. RETUYT in TASS 2017: Sentiment Analysis for Spanish Tweets using SVM and CNN. 2017.
- [12] Rosenthal S, Farra N, Nakov P. 2017. SemEval-2017 Task 4: Sentiment Analysis in Twitter. Proc. 11th Int. Work. Semant. Eval.: 502–518.
- [13] Shrestha P, Sierra S, González FA, Rosso P, Montes-Y-Gómez M, Solorio T. 2017. Convolutional Neural Networks for Authorship Attribution of Short Texts. Proc. 15th Conf. Eur. Chapter Assoc. Comput. Linguist. 2: 669–674.
- [14] Wehrmann J, Becker WE, Barros RC. 2018. A Multi - Task Neural Network for Multilingual Sentiment Classification and Language Detection on Twitter. 8.
- [15] Wong TT, Yang NY. 2017. Dependency Analysis of Accuracy Estimates in k-Fold Cross Validation. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 29: 2417–2427.

# **COMPARACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN UN TRANSFORMADOR TIPO SECO DE 5 KVA ANTE CARGA LINEAL Y NO LINEAL**

## *COMPARISON OF LOSSES IN A 5 kVA DRY-TYPE TRANSFORMER WITH A LINEAR AND NON-LINEAR LOAD*

**Israel González Pérez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*israel\_gonzpe@yahoo.com*

**José Antonio Álvarez Salas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*jaas@uaslp.mx*

**Juan Segundo Ramírez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*juan.segundo@uaslp.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se presentan algunos resultados en simulación y mediciones de laboratorio de un transformador tipo seco de 5 kVA con carga lineal y no lineal. Se propone comparar el efecto en las pérdidas del transformador cuando éste alimenta a un arreglo de resistencias trifásicas como carga lineal, así como un arreglo monofásico y dos arreglos trifásicos de rectificadores de potencia como carga no lineal. Por medio de la diferencia de potencias entre la salida y la entrada se determinaron las pérdidas del transformador. Adicionalmente, se presentan las mediciones de temperatura en el transformador ante diferentes niveles de carga lineal obtenidas mediante dos termopares que se encuentran incluidos entre los devanados y su núcleo.

**Palabras clave:** Carga lineal, carga no lineal, pérdidas, transformador seco.

### **Abstract**

This paper presents the simulation and laboratory results of a dry-type transformer of 5 kVA operating with linear and nonlinear loads. The effect of these types of loads on the transformer power losses is analyzed. The linear load is a three-phase

resistance arrangement, while the nonlinear loads are three single-phase and two three-phase rectifiers. The power losses are the difference between the input and the output power of the transformer obtained under the different loading conditions. In addition to this, through two thermocouples included within the windings and core, temperature measurements against different loading levels of the linear load are reported.

**Keywords:** Linear load, non-linear load, transformer, transformer losses.

## **1. Introducción**

Los transformadores son uno de los dispositivos más empleados en los sistemas eléctricos industriales, de distribución y de potencia. Existen en diferentes capacidades y tamaños, del tipo seco o inmersos en algún medio (p. ej., aceite, gas), capaces de aislar y mantener su temperatura adecuada de operación.

Su apropiado dimensionamiento determina la correcta operación del transformador; se busca mantener el valor de sus pérdidas por debajo de su límite térmico [Cazacu, 2017]. Típicamente las pérdidas presentes en los transformadores varían en función de su capacidad y tipo de cargas que se conectan a éste; sin embargo, cuando se consideran cargas que son no sinusoidales se modifica la cantidad de pérdidas en el transformador [IEEE C57.120-2017]. En general, un transformador en el que la corriente distorsionada excede el 5% de contenido armónico puede producir un mayor calentamiento en sus devanados y núcleo [IEEE C57.110-1986].

Prácticamente hoy en día las cargas en los sistemas industriales y comerciales son una mezcla de cargas con comportamiento sinusoidal y no sinusoidal de su voltaje y corriente. Lo anterior se debe al amplio uso de dispositivos electrónicos en equipos que procesan la energía eléctrica en forma conmutada. Las cargas antes mencionadas son alimentadas generalmente por transformadores, los cuales acondicionan los niveles de voltaje y corriente para un mejor desempeño de sus respectivos circuitos. Por lo anterior, es importante evaluar el comportamiento de las pérdidas ante condiciones no sinusoidales, ya que en este escenario se puede considerar un ajuste en su capacidad, así como una mejora en su eficiencia [Nicolae, 2016].

Las pérdidas en los transformadores pueden ser divididas en: pérdidas en vacío ( $P_{SC}$ ) y pérdidas con carga ( $P_{PC}$ ), como se indica en la ecuación 1.

$$P_T = P_{SC} + P_{PC} \quad (1)$$

Las pérdidas en vacío son función del voltaje en el transformador, en la presencia de armónicos depende de la distorsión del voltaje aplicado y del diseño del núcleo del transformador. Debido a que este tipo de pérdidas son más difíciles de cuantificar, se han desarrollado algunas técnicas que buscan corregir los errores en su medición [Arseneau, 2005]. Las pérdidas con carga dependen de los calibres de los conductores con que se forman las bobinas del primario y secundario, y son generalmente pérdidas por efecto Joule. Debido a la resistencia en corriente directa, se les conoce como pérdidas en el cobre. Si el transformador sólo se especifica para la potencia en kVA de la carga, las corrientes armónicas hacen que el valor eficaz sea mayor que su capacidad, lo que tendrá un incremento en las pérdidas de los conductores [Harper, 1999].

Otras pérdidas con carga son las pérdidas por corrientes circulantes. Son corrientes muy pequeñas en el transformador y son causadas por el flujo magnético; fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético. Se incrementan con el cuadrado de la frecuencia de la corriente, por lo que es una componente significativa de las pérdidas en el transformador [Elmoudi, 2006]. Debido a lo anterior, las pérdidas con carga en el transformador tienen dos componentes: pérdidas en el cobre ( $P_{CU}$ ) y las pérdidas por corrientes circulantes ( $P_{CC}$ ), como se indica en la ecuación 2.

$$P_{PC} = P_{CU} + P_{CC} \quad (2)$$

El propósito de este trabajo es analizar, por medio de simulación digital y con pruebas de laboratorio, el incremento en las pérdidas del transformador bajo condiciones de carga lineal y no lineal. Se eligieron tres configuraciones con diodos de potencia que típicamente se utilizan en procesos de rectificación industrial.

El proceso de rectificación demanda la utilización de transformadores de potencia que modifiquen los niveles de tensión y corriente que llegan al convertidor. Los

procesos de rectificación monofásico y trifásico suministran corriente continua a partir de una señal de corriente alterna. Son muy demandados en diferentes aplicaciones industriales. Sus configuraciones, especificaciones y formas de onda de voltaje y corriente se han estudiado ampliamente [Hart, 2001].

Debido a que es la primera etapa del proyecto en el cálculo de pérdidas del transformador, y que al momento de realizar este trabajo no se contó con los elementos necesarios para implementar la carga no lineal en el laboratorio, se procedió a realizar en PSIM la simulación digital de las diferentes configuraciones monofásicas y trifásicas de los diodos de potencia. Los parámetros del circuito por fase del transformador fueron incorporados al modelo digital para analizar el comportamiento de los voltajes, corrientes y potencias de entrada y salida. En el laboratorio se realizaron mediciones de potencia con diferentes porcentajes de la carga lineal.

## **2. Métodos**

### **Cálculo de pérdidas**

Para el cálculo de pérdidas se utilizó un transformador tipo seco de 5 kVA, los datos nominales aparecen en la tabla 1.

Tabla 1 Valores nominales del transformador.

Fases	Capacidad	Tipo	Frecuencia	% Eficiencia
3	5 kVA	Seco	60 Hz	98.1
Tensión	Corriente	Conexión	% Impedancia	Elev.-Temp.
220/440 V	13.2/6.56 A	Delta-Estrella	3.75	65° C

En la figura 1 se muestra el transformador tipo seco de 5 kVA y sus indicadores de temperatura conectados a termopares tipo “J” colocados entre las bobinas del primario y secundario, y en la estructura del núcleo. Su diseño fue proyectado para evaluar el impacto de la carga no lineal con el incremento de su temperatura.

La metodología para evaluar las pérdidas corresponde al análisis de la transferencia de potencia de un circuito con una fuente sinusoidal a una carga no lineal.

En la figura 2 se muestra esta configuración. Si el voltaje de alimentación es sinusoidal, la corriente será no sinusoidal debido a la carga no lineal. La corriente

de la carga no lineal es no sinusoidal, por lo que su valor eficaz se define por la ecuación 3 [IEEE Std 1459-2010].

$$I_{rms} = \sqrt{I_0^2 + I_{rms-1}^2 + I_{rms-2}^2 + I_{rms-3}^2 + I_{rms-4}^2 \dots I_{rms-h}^2} \quad (3)$$



Figura 1 Transformador de 5 kVA.

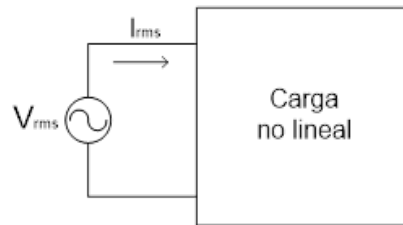


Figura 2 Fuente sinusoidal y carga no lineal.

En la corriente no sinusoidal se puede calcular la contribución de los armónicos en la deformación de la señal a través del cálculo de la distorsión armónica total (*THD*), de acuerdo a la ecuación 4 [IEEE Std 1459-2010].

$$THD_I = \frac{\sqrt{I_0^2 + I_{rms-2}^2 + I_{rms-3}^2 + I_{rms-4}^2 \dots I_{rms-h}^2}}{\sqrt{I_{rms-1}^2}} * 100 \quad (4)$$

Se realiza una ponderación entre los valores eficaces de los armónicos  $I_0, I_{rms-2}, I_{rms-3}, \dots, I_{rms-h}$ , y el valor eficaz de la componente fundamental  $I_{rms-1}$ . Entre más distorsionada esté la forma de onda mayor será su *THD* de corriente.

Si en la fuente sinusoidal de la figura 2 se considera el secundario del transformador y la carga no lineal con las diferentes configuraciones de los rectificadores, entonces las pérdidas expresadas por la ecuación 2 serán afectadas por la distorsión de su corriente.

Las pérdidas en el cobre y las pérdidas por corrientes circulantes dependen del valor eficaz de la corriente, así como del cuadrado del orden de armónico presente en las señales distorsionadas como se indica en ecuaciones 5 y 6 [IEEE C57.110-1986].

$$P_{CU} = I_{rms}^2 R_{cd} \quad (5)$$

$$P_{CC} = P_{CC-R} \sum_{h=1}^{h=\max} h^2 \left( \frac{I_{rms-h}}{I_{rms-1}} \right)^2 \quad (6)$$

Por otro lado, la potencia de entrada de cualquier transformador debe ser capaz de suministrar la potencia de salida más las pérdidas internas que se generan en éste. Si se mide la diferencia de potencias en la entrada y la salida se obtendrá la potencia pérdida de acuerdo con la ecuación 7 [Guru, 2002].

$$P_{PÉRDIDAS} = P_{ENTRADA} - P_{SALIDA} \quad (7)$$

Para la simulación y medición de las pérdidas en el transformador, se implementó el circuito de prueba de la figura 3. En este circuito se mide la potencia activa trifásica en la entrada y salida del transformador por el método de los dos wáttmetros, como se indica en ecuaciones 8 y 9 [Sen, 2010].

$$P_{ENTRADA} = W_1 + W_2 \quad (8)$$

$$P_{SALIDA} = W_3 + W_4 \quad (9)$$

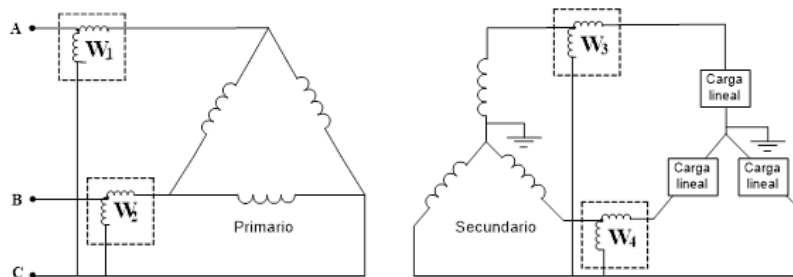


Figura 3 Circuito de medición de pérdidas en el transformador con carga lineal.

Los wáttmetros  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  y  $W_4$ , son equipos monofásicos de medición digital de potencia con capacidad de registrar corrientes y voltajes no sinusoidales.

Sustituyendo las ecuaciones 8 y 9 en la ecuación 7 se obtiene la ecuación 10.



$$P_{PERDIDAS} = (W_1 + W_2) - (W_3 + W_4) \quad (10)$$

La ecuación 10 representa la forma a través de la cual se simularon y midieron las pérdidas en el transformador con carga lineal y no lineal en este trabajo. En esta etapa del proyecto no se analizan por separado las pérdidas que se indican en la ecuación 2. Estas pérdidas tienen afectación con el cambio de carga y la modificación de la carga no lineal.

### Parámetros del transformador

Los parámetros del transformador que se utilizaron en las simulaciones de PSIM y Matlab se presentan en la tabla 2, a través de la implementación en el laboratorio de la prueba de circuito abierto y cortocircuito en el transformador. La prueba de circuito abierto se realizó en el lado de bajo voltaje (conexión en delta) con el lado de alto voltaje en circuito abierto. La prueba de cortocircuito se realizó en el lado de alto voltaje a tensión reducida de la fuente de alimentación trifásica (conexión en estrella) con el lado de bajo voltaje en cortocircuito [Pérez, 1985].

Tabla 2 Parámetros del circuito equivalente por fase.

Rama de magnetización	Impedancia del primario	Impedancia del secundario
$X_M = 266.310 \Omega$	$X_1 = 0.04 \Omega$	$X_2 = 0.160 \Omega$
$R_C = 565.102 \Omega$	$R_1 = 0.13 \Omega$	$R_2 = 0.515 \Omega$

### Circuitos rectificadores

En las tres configuraciones de los diodos como carga no lineal, se generó un cambio en la distorsión armónica total de las corrientes del transformador, por lo que se eligieron las siguientes configuraciones:

- Tres rectificadores monofásicos onda completa.
- Rectificador trifásico en puente completo.
- Rectificador trifásico en medio puente.

En la tabla 3 se muestran los diferentes porcentajes de THD en las corrientes de entrada y salida del transformador. El valor más bajo de THD en las corrientes le

corresponde a la configuración de los tres puentes monofásicos de diodos. Sin embargo, sus pérdidas en el transformador mantuvieron una pequeña diferencia respecto a las pérdidas con carga lineal como se muestra en los resultados de simulación.

Tabla 3 Distorsión armónica de las corrientes de entrada salida.

Puente monofásico % THD		Puente trifásico % THD		Medio puente trifásico % THD	
Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
10.3	0.135	30	28.5	63.7	105.4

La carga resistiva de los rectificadores que se utilizaron en las simulaciones se modificó en incrementos de 20 a 120%, como se muestra en la tabla 4. En la parte experimental a través de un banco de resistencias de potencia de  $16.3 \Omega @ 1000 \text{ W}$  se realizaron arreglos serie-paralelo para obtener los porcentajes de cambio en la carga resistiva en 60, 80 y 120%.

Tabla 4 Porcentajes de cambio de carga.

Configuración	Resistencia ( $\Omega$ )					
	20%	40%	60%	80%	100%	120%
Puente completo trifásico	345.06	172.53	115.02	86.26	69.01	57.51
Medio puente trifásico	86.72	43.36	28.91	21.68	17.34	14.45
Tres puentes monofásicos	193.59	96.80	64.53	48.40	38.72	32.27
En estrella con carga resistiva	192.04	96,02	64.01	48.01	38.41	32.01

### 3. Resultados

Los resultados para el cálculo de las pérdidas se realizaron con carga lineal en simulación y mediciones de laboratorio y para la carga no lineal sólo en simulaciones. En las siguientes secciones se describen las formas de onda y gráficas de las pérdidas del transformador en estos dos escenarios.

#### Carga lineal

En el laboratorio se realizaron pruebas para la medición del incremento de temperatura en el transformador tanto en las bobinas como en el núcleo. En la figura 4 se muestran las mediciones del transformador en el laboratorio. Se utilizaron los medidores digitales de potencia como se indica en el circuito de la figura 3.

Con la variación de carga en los porcentajes indicados en la tabla 4, se tomó lecturas de la temperatura proveniente de los termopares en intervalos de diez minutos durante cincuenta minutos.



Figura 4 Medición de pérdidas en el transformador con carga lineal.

Como se puede observar en las figuras 5 y 6, es más rápido el crecimiento de la temperatura en los devanados del transformador que en el núcleo. Los devanados tienen que soportar principalmente el efecto de calentamiento de las pérdidas en el cobre de acuerdo con la ecuación 5. El transformador permite la elevación de temperatura de 65 °C sobre la temperatura ambiente, como se indica en la tabla 1. De ahí la posibilidad de sobrecargarlo en un 20% durante la prueba.

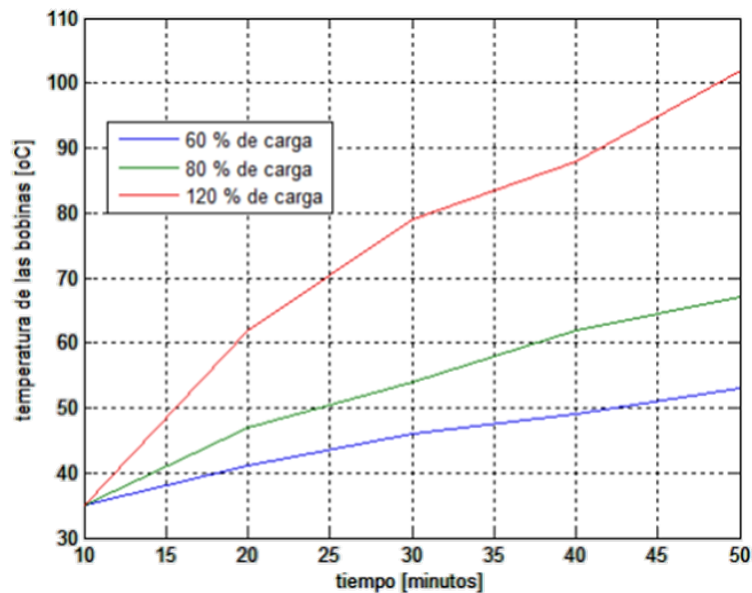


Figura 5 Gráfica del incremento de temperatura en las bobinas.

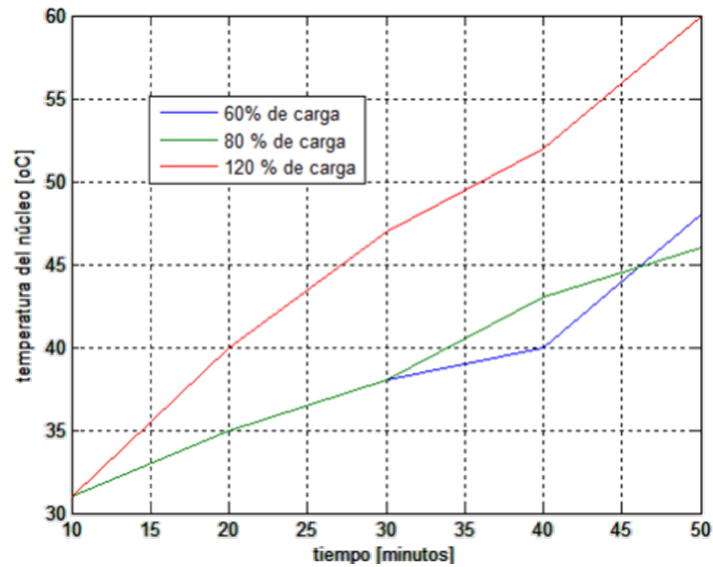


Figura 6 Gráfica del incremento de temperatura en el núcleo.

En la figura 7 se presenta una comparación entre la medición y la simulación de la eficiencia del transformador con carga lineal. En las gráficas se considera un 1.5% de error debido a la exactitud del modelo empleado en la simulación.

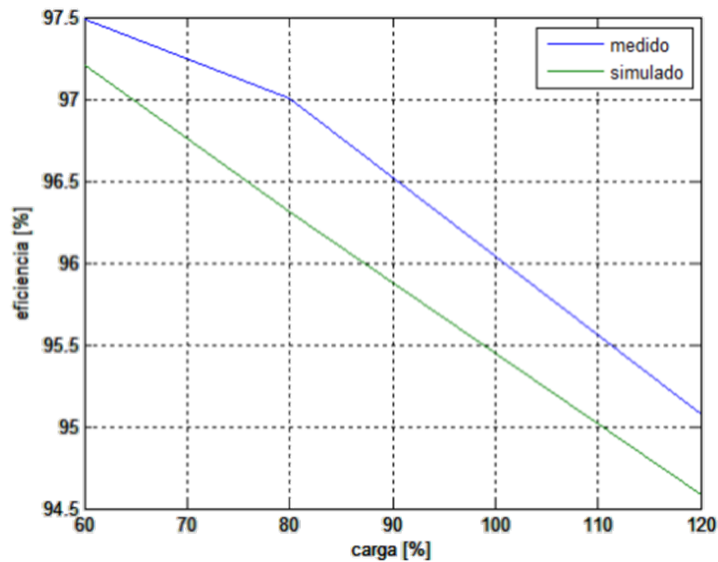


Figura 7 Cambio de la eficiencia del transformador en función de la carga lineal.

### Carga no lineal

En la figura 8 se comparó la eficiencia entre los dos rectificadores trifásicos de diodos conectados al transformador. Se compararon los rectificadores, por el valor

del THD que existen entre sus corrientes de línea. El rectificador de medio puente trifásico presenta una pendiente en descenso debido a la deformación de sus corrientes de línea que tiene que suministrar el transformador.

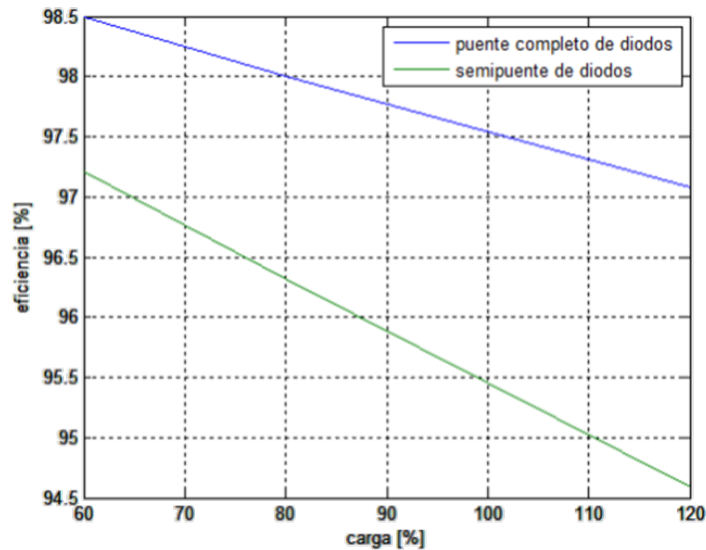


Figura 8 Eficiencia del transformador en función de la carga no lineal.

En la figura 9 se muestran las formas de onda del voltaje y la corriente de terminales en el transformador cuando alimenta el rectificador de medio puente trifásico. El voltaje de terminales de la figura 9 presenta una pequeña deformación por el proceso de polarización de los diodos de potencia en cada una de sus ramas, esta perturbación se denomina “notching”. Sin embargo, no contribuye en las pérdidas de la ecuación 10.

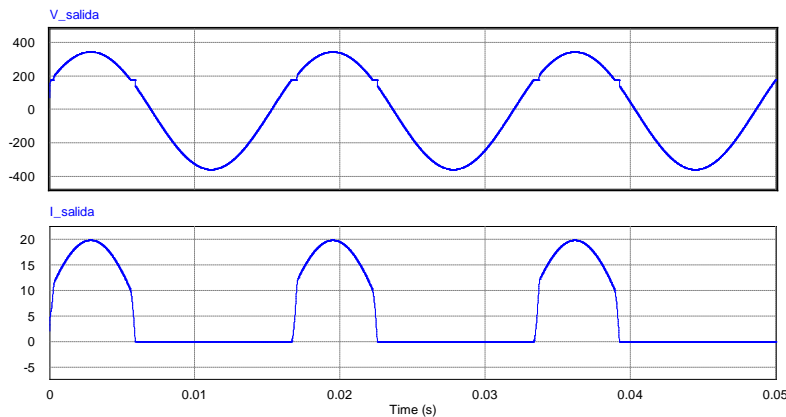


Figura 9 Voltaje y corriente de línea (THD= 105.4 %) en el secundario.

Algo similar sucede con las formas de onda del rectificador trifásico de puente completo, como se muestran en la figura 10. Su voltaje de terminales presenta la perturbación “notching” y su corriente de terminales tiende a formar una señal cuadrada, por lo que su contribución a las pérdidas de la ecuación 10 es también considerable.

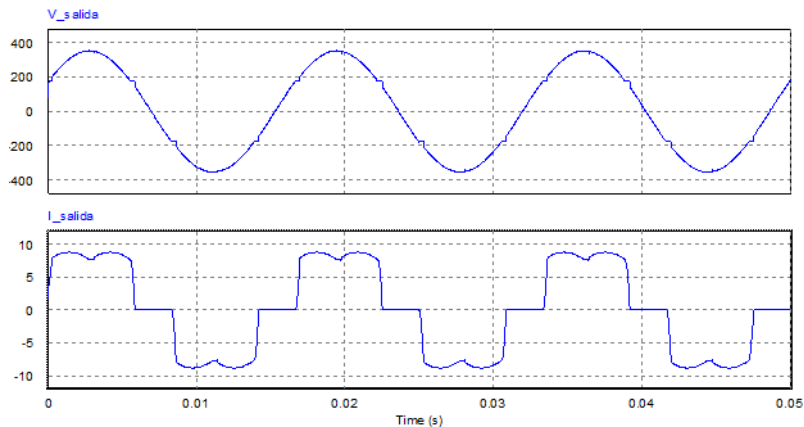


Figura 10 Voltaje y corriente de línea (THD=28.5%) en el secundario.

En la figura 11 se compararon las pérdidas de potencia en el transformador para las diferentes configuraciones de carga lineal y no lineal.

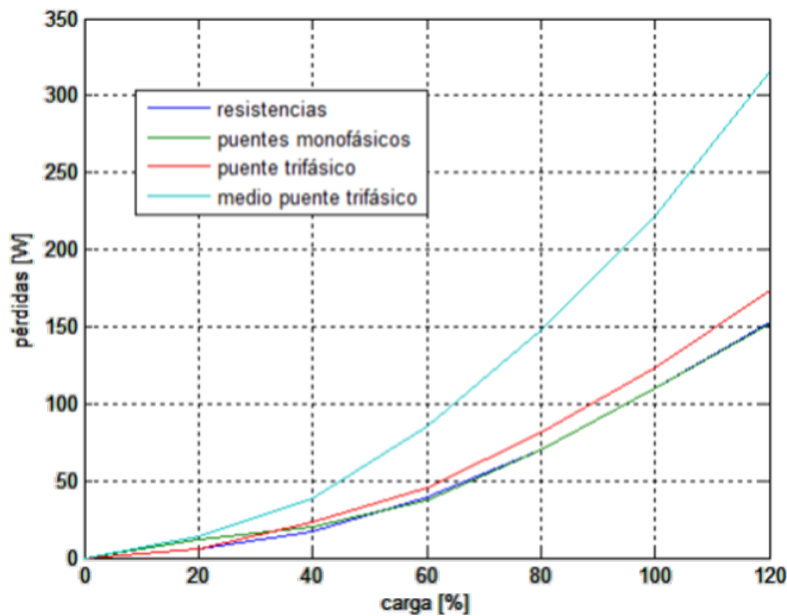


Figura 11 Comparación de las pérdidas en el transformador con carga lineal y no lineal.

Por medio de la ecuación 10 se graficaron las pérdidas con variación de carga de acuerdo con la tabla 3. El propósito de esta comparación es conocer las pendientes de ascenso de las gráficas de pérdidas en función de su carga lineal y no lineal.

La gráfica con mayor pendiente fue la asociada al medio puente trifásico, su alto contenido armónico de las corrientes contribuye a las pérdidas por efecto Joule y corrientes circulantes en el transformador.

#### **4. Discusión**

Los valores simulados y medidos de las potencias en el transformador tipo seco de 5 kVA son un indicativo del comportamiento de las pérdidas respecto al tipo de carga lineal y no lineal. En este momento se tiene un avance sobre la experiencia en la simulación del transformador, sus formas de onda en voltaje y corriente y su relación con las pérdidas. El comportamiento del modelo en simulación y las mediciones en pérdidas son aceptables para la carga lineal, el porcentaje de error no es mayor al 2%, como se muestra en la gráfica de la figura 7. La proporción de pérdidas en con la carga no lineal es mayor para el medio puente trifásico, la deformación de sus formas de onda condiciona el incremento de las pérdidas en el cobre del transformador.

Se han calibrado los termopares incluidos en el transformador para obtener lecturas de temperatura. El incremento de las temperaturas en los devanados y el núcleo se asocian con el incremento de las pérdidas en el transformador. A pesar de no desarrollar un modelo térmico del transformador, la concentración del calor en sus devanados se asocia con el incremento de las pérdidas en el cobre.

Para las gráficas de las figuras 5 y 6 el tiempo de prueba y la elevación de temperatura del transformador se limitó por la capacidad térmica de los arreglos de las resistencias conectadas en las terminales del transformador. El límite térmico de este transformador es un incremento de 65° C sobre la temperatura ambiente como lo especifica el fabricante. Si este límite térmico se sobrepasa se disminuye su capacidad y eficiencia como se indica en la gráfica de la figura 7.

Respecto a la carga no lineal, la siguiente etapa de este proyecto es comparar las pérdidas en el transformador que generan las diferentes configuraciones de los

diodos en laboratorio. Desarrollar estas configuraciones permitirá identificar el comportamiento de las pérdidas debido a la circulación de corrientes armónicas como se establece en IEEE C57.110-1986. El apoyo técnico y didáctico de este proyecto, permitirá capacitar a los alumnos del área de licenciatura y posgrado involucrados con sistemas eléctricos y electrónicos de potencia.

## **5. Conclusiones**

Se han presentado los resultados de la simulación y resultados parciales de laboratorio de un transformador de 5 kVA. Los resultados que se presentan aquí son la primera etapa de un proyecto que se ha venido desarrollando para estimar y medir las pérdidas en transformadores secos de uso industrial que típicamente alimentan a convertidores de electrónica de potencia o algún equipo electrónico el cual se considera como carga no lineal.

Las normas vigentes son claras al respecto de las cargas no lineales en el transformador. Sin embargo, desarrollar infraestructura que permita visualizar de forma práctica las pérdidas, contribuye en una mejor formación y capacitación del personal involucrado. Lograr entender el comportamiento de las pérdidas en los transformadores permite a estudiantes e ingenieros la especificación correcta de estos equipos.

Se agradece al Fondo de Apoyo de la Investigación de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (C17-FAI-06-62.62), el apoyo económico brindado para la realización de este proyecto.

## **6. Bibliografía y referencias**

- [1] Arseneau R., So E., Hanique E. Measurements and Correction of No-Load Losses of Power Transformers, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 54, No 2, pp 503-506, 2005.
- [2] Elmoudi A., Lethonen M. Effect of harmonics on transformers loss of life, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp 408-411, 2006.
- [3] Guru B. S., Hizioglu H.R. Máquinas Eléctricas y Transformadores, Alfaomega, 3ª Ed, 2002.



- [4] Cazacu E., Petrescu L., Lonita V. Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents, 15th International Conference on Electrical Machines Drives and Power Systems, 2017.
- [5] Hart D. W. *Electrónica de Potencia*, Prentice Hall, 2001.
- [6] Harper E. *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*, LIMUSA, 1999.
- [7] IEEE Std. 1459-2010, Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, Unbalanced Conditions.
- [8] IEEE Std. C57.120-2017, Guide for Loss Evaluation of Distribution and Power Transformers and Reactors.
- [9] IEEE Std. C57.110-1986, Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-Sinusoidal Load Currents.
- [10] Nicolae P.-M., Smarandescu I.D., Nicolae M.E., Popa D.-L., Nicolae I.-D. Considerations on a MV/LV transformer which supplies distorting load, IEEE International Power Electronics on Motion Control Conference (PEMC), pp 354-359 2016.
- [11] Perez Amador V., *Pruebas de equipo eléctrico, transformadores de distribución y potencia*, LIMUSA ,1985.
- [12] Sen P.C., *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, John Wiley and Sons, 3a ed, 2010.

# **ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA EL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL DE UN TALADRO UTILIZANDO VENSIM PLE**

## *ANALYSIS OF SCENARIOS FOR THE INDUSTRIAL MAINTENANCE OF A DRILL USING VENSIM PLE*

**Jesús Vicente González Sosa**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jvgs@azc.uam.mx*

**Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*lwra@correo.azc.uam.mx*

**Jesús Loyo Quijada**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*lqj@correo.azc.uam.mx*

**Mariana Hernández González**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mhg@correo.azc.uam.mx*

**Miguel Ángel López Ontiveros**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mlopez@correo.azc.uam.mx*

### **Resumen**

Un aspecto importante dentro del mantenimiento industrial radica en que no se elaboran simulaciones, y se debe considerar que el mantenimiento es un modelo dinámico en donde está latente el parámetro del tiempo.

El mantenimiento industrial tiene diversas vertientes, las cuales podemos identificar como mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo, en donde se involucran los elementos que logran satisfacer características esenciales del mantenimiento mostrando escenarios en un entorno gráficos de Vensim Ple.

Los escenarios de análisis permiten evaluar los elementos necesarios para abordar al mantenimiento en sus diferentes fases en función al desempeño del proceso involucrado.

Los resultados obtenidos mediante esta herramienta son una base de datos con cada uno de los casos de éxito y aquellos que han generado una dificultad en

análisis y resolución, la base de datos sirve como fuente de información en variables que se definen dentro del modelo para su posterior simulación y análisis de escenarios.

**Palabras Clave:** Análisis, dinámica, herramienta, mantenimiento, Vensim Ple.

## **Abstract**

*An important aspect of industrial maintenance is that there are no simulations made, and it should be considered that maintenance is a dynamic model where the time parameter is latent.*

*Industrial maintenance has different aspects, which we can identify as predictive, preventive and corrective maintenance, where the elements that manage to satisfy essential maintenance characteristics are involved, showing Scenarios in a graphical environment of Vensim Ple. The analysis scenarios allow to evaluate the elements necessary to approach the maintenance in its different phases according to the performance of the process involved. The results obtained through this tool are a database with each one of the success cases and those that have generated a difficulty in analysis and resolution, the database serves as a source of information in variables that are defined within the model for its subsequent simulation and analysis of scenarios..*

**Keywords:** Analysis, dynamics, tool, maintenance, Vensim Ple.

## **1. Introducción**

El mantenimiento consiste en una serie de actividades con cuya ejecución se logra alcanzar un mayor grado de confiabilidad en los equipos, máquinas, construcciones civiles e instalaciones, preserva sus funciones y afecta todos los aspectos de una organización: disponibilidad y costos, seguridad, integridad ambiental, eficiencia energética y calidad de productos. Entonces, el objetivo del mantenimiento de máquinas y equipos se puede definir cómo conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producción en condiciones de calidad exigible, al mínimo costo y con el máximo de seguridad para el personal que las utiliza y mantiene [Penkova, 2007].

La escasez de modelos de simulación de sistemas y procesos de innovación no es sorprendente. Como fenómeno social, la innovación es extremadamente compleja. En general, la complejidad de los fenómenos sociales, a diferencia de los fenómenos físicos, hace que los modelos de simulación contruidos para pronosticar su comportamiento sean muy poco confiables. Sin embargo, como método de investigación científica, la simulación de fenómenos sociales y demás ha demostrado ser bastante exitosa, al revelar importantes relaciones y principios a partir de modelos relativamente simples [Axelrod, 1997].

El uso de nuevas herramientas en el desarrollo del mantenimiento ha logrado identificar nuevas estrategias para su aplicación en donde se ha encontrado una línea de oportunidad para el aprovechamiento de software enfocado a la simulación de procesos dinámicos, por lo que se tiene, el mantenimiento industrial en cualquiera de sus etapas involucra el tiempo, ya sea para analizar, fundamentar y poner en marcha un plan, el cual tiene la característica de ser factor predominante en el análisis de sistemas dinámicos.

Por otro lado, se tiene el uso de Vensim Ple, ofrece resultados gráficos que permiten una comprensión de las temáticas y casos de estudio en donde es relevante su aplicación como una herramienta en el mantenimiento.

Es importante mencionar que el programa trabaja con modelos cuyo impacto está dirigido al sector educativo-industrial, igualmente establece límites para la aplicación de gráficos, contemplando que tiene una interfaz amigable y un uso intuitivo al igual que su manejo.

La aplicación de las simulaciones permite a los estudiantes visualizar los efectos reales de un proceso que a su vez se pueda extrapolar al sector industrial por la afinidad que se tiene el desarrollo de los algoritmos que al final son gráficos, tablas e indicadores de que un proceso, el proceso de mantenimiento se puede analizar por medio de este tipo de herramienta computacional.

Con los modelos se pretende visualizar las relaciones existentes entre los mantenimientos y las funciones asociadas que permiten el desarrollo del trabajo enfocado a determinar los efectos múltiples que se analizan con la herramienta mencionada.

Además, en cuanto a la evaluación del mantenimiento por medio de Vensim Ple es una innovación, dado que investigadores y profesionales no han aplicado el análisis dinámico con esta herramienta, ya que existen softwares en donde se lleva a cabo la administración, gestión y control del mantenimiento más no un análisis detallado con respecto al tiempo a través de herramientas dinámicas.

Se tiene la existencia de otros softwares para el análisis dinámico como lo es Stella, SigmaPlot, Simulink, OpenModelica, Simantics System Dynamics, Minky, entre otros, pero como se ha mencionado solo se utilizan para sistemas dinámicos ideales y en este caso se lleva a cabo en un caso real para analizar el mantenimiento de un taladro industrial y con ello validar el uso de la herramienta y el vínculo en otras áreas diversas en donde se controla el tiempo para la aplicación tangible.

Hoy en día se dispone de entornos de simulación muy flexibles que permiten construir un modelo de forma amigable, que no requieren conocimientos informáticos de alto nivel para su utilización, se adaptan bastante bien a las necesidades de los usuarios y simulan los modelos en tiempo real mostrando su comportamiento.

En el mercado existen tres suites de Dinámica de Sistemas que compiten al mismo nivel que corren solamente en entornos Windows y Macintosh, no hay versiones para posix (UNIX, Linux): la familia de software Vensim® de Ventana Systems Inc., Powersim Studio™ de los noruegos Powersim Software y los paquetes iThink® y STELLA® de Isee Systems (antes High Performance Systems).

Para construir el Diagrama Causal, los diagramas de Forrester, el modelo matemático y para su posterior simulación se ha utilizado el entorno de simulación dinámica Vensim PLE® (<http://www.vensim.com/>) de Ventana Systems Inc. Es un software gratuito para usos educativos y personales, no caduca, y tiene una importante prestación que otras marcas de software no ofrecen en sus versiones gratuitas: puede guardar el modelo que haya creado. Se recomienda consultar el análisis comparativo realizado por [Andrade, 2010] sobre el software disponible para simulación dinámica.

En general el análisis el mantenimiento de un equipo, sistema o proceso se lleva a cabo por medio de formatos en donde se contempla la cuestión preventiva,

predictiva y correctiva del mantenimiento, que es la forma coloquial para este tipo de casos, sin embargo en este trabajo se plantea un análisis desde el punto de vista dinámico, el cual controlara de una forma determinada el tiempo enfocándolo a escenarios que tienen variables tanto dependientes como independientes para su aplicación con la herramienta de Vensim Ple.

## 2. Métodos

Este trabajo tiene un enfoque teórico-práctico, por lo que se analizan aspectos teóricos del mantenimiento aplicados a casos reales en donde se englobará el uso de una herramienta para comprender desde el punto de vista dinámico las temáticas en cuestión para la formulación de los diversos procesos existentes en la industria. A continuación, se tiene el análisis por medio de la herramienta para la descripción del mantenimiento y en párrafos posteriores se vinculará de forma directa con ejemplos tangibles que permiten comprender la importancia del software en las temáticas mencionadas.

En primera instancia se realiza una estructura de los tipos de mantenimiento por medio del software de Vensim Ple, en donde se visualiza la relación entre ellos, enfocados a la mejora continua de cada una de las clasificaciones en cuestión.

En la figura 1 se aprecia de manera gráfica cada uno de los mantenimientos y la relación entre ellos, con lo que se logra identificar los parámetros críticos del mantenimiento con respecto a sus características comunes durante su implementación.

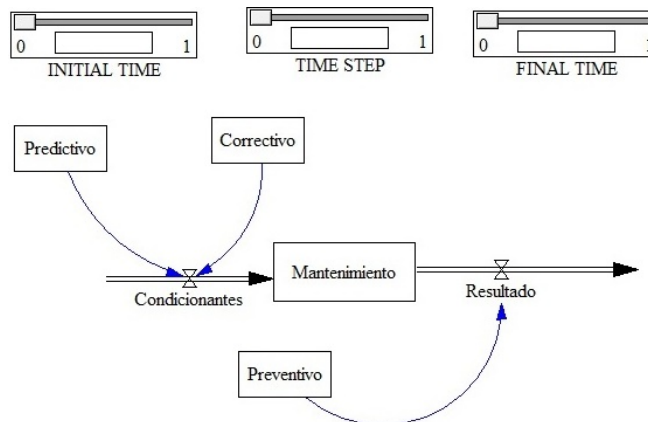


Figura 1 Proceso de mantenimiento desde VENSIM.

Por otro lado, se analizan las etapas y escenarios de cada mantenimiento por medio de la herramienta en donde se tienen los aspectos medibles y que muestran como parte del resultado los gráficos con la dependencia correspondiente y las ecuaciones vinculadas con el proceso.

Como se observa en cada uno de los diagramas de la figura 2, el mantenimiento independiente del tipo va a generar estándares para la formulación de este mismo y ello se logra realizando diversas actividades con las herramientas internas del software de Vensim Ple, en donde se logra identificar la tendencia del mantenimiento en dependencia con sus variables involucradas en cada tipo, buscando homogenizar algunas de las tareas de cada uno de ellos.

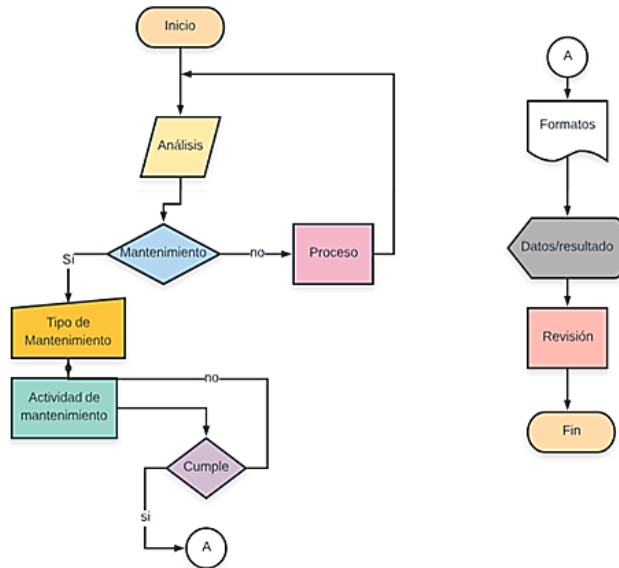


Figura 2 Diagrama de flujo del mantenimiento.

En lo que respecta al aprovechamiento del software dentro del desarrollo de este trabajo es necesario mencionar los criterios requeridos para lograr involucrar la herramienta en el proceso de mantenimiento y a la inversa.

Por lo cual, en la tabla 1 se muestran los criterios básicos del software para el uso en los procesos dinámicos que se vinculan con el mantenimiento industrial, con lo cual se establecen los conceptos que se pueden controlar dentro de la aplicación de la herramienta de Vensim Ple, cuyo propósito radica en identificar los aspectos tangibles en un caso de ingeniería industrial.

Tabla 1 Criterios comunes en mantenimiento en el uso de Vensim Ple.

<b>Criterio</b>	<b>Descripción</b>
Frecuencia	Repetibilidad en los ciclos de mantenimiento para un mejor uso y funcionamiento del equipo.
Flujo	Cantidad de mantenimientos que se deben realizar en un periodo establecido para el equipo y su uso.
Afectación	Elementos que afectan las condiciones ideales del equipo para su buen funcionamiento, con respecto a los aspectos del mantenimiento para el caso de estudio.
Desempeño	Está en función a la producción real obtenida derivada de las afectaciones del mantenimiento y la producción que teóricamente se puede producir.
Inventario	La disponibilidad del equipo para realizar las tareas signados para lograr la producción.
Producción	Cantidad de piezas y/o productos que se pueden elaborar, de acuerdo con la capacidad de producción, establecido por un tiempo estándar.

Con los criterios establecidos en la tabla 1 se desarrolla la aplicación de Vensim Ple en el mantenimiento a través de casos tangibles, que permiten comprender de manera metodológica el uso de la herramienta como parte del desarrollo en la ingeniería a través de casos de estudio.

El caso para analizar por medio de Vensim Ple corresponde al mantenimiento de un taladro industrial, el caso práctico analizado se deriva de un estudio realizado por los estudiantes y que el software ayudó a emitir conclusiones que permiten realizar una evaluación concreta, que se describe en los siguientes párrafos.

### **Modelo desarrollado para el taladro industrial**

En la figura 3 se presenta el modelo desarrollado en el software Vensim Ple. En él se establecen las afectaciones de los diferentes mantenimientos (semestral, bimestral, mensual, quincenal, semanal y diario) en el flujo de producción de un taladro industrial. El modelo permite analizar diferentes opciones de evaluación del mantenimiento programado al variar los tiempos que este implica. Las afectaciones se determinan una vez que se registran los tiempos y la frecuencia de cada tipo de mantenimiento y éstas se incorporan al flujo de producción real del taladro industrial. Una versión “ideal” se considera en paralelo, al analizar el flujo de producción teórico el cual no tiene ningún tipo de afectación de tiempos de paros.



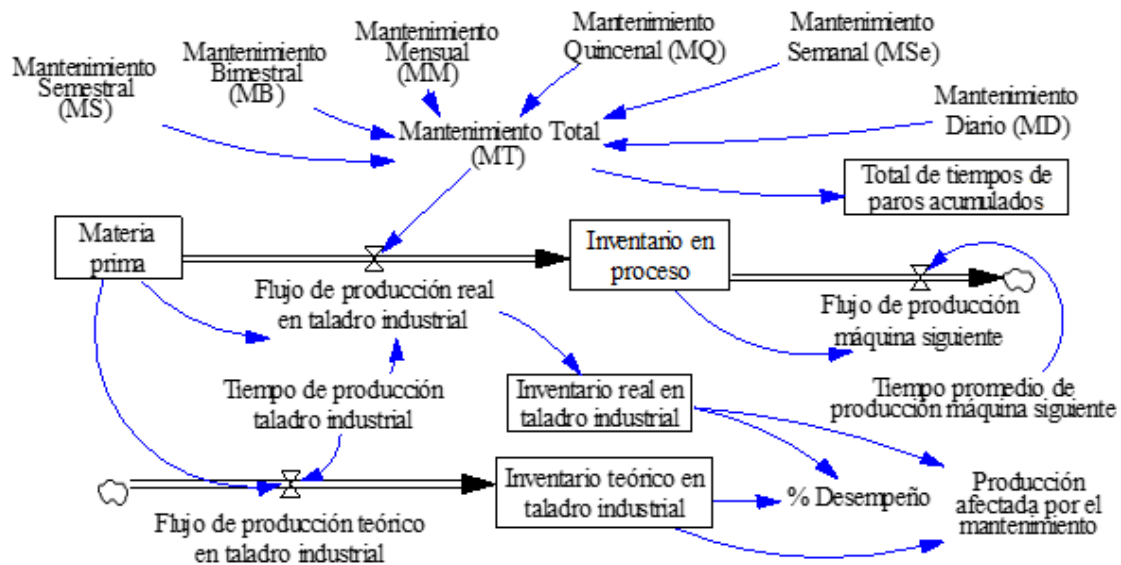


Figura 3 Modelo desarrollado.

El análisis de evaluación del mantenimiento registrado se realiza primeramente en función al % de desempeño, el cual se obtiene al comparar el inventario real e inventario teórico proveniente de la producción del taladro industrial al considerar las afectaciones del mantenimiento. Por otro lado, también se evalúa el total de tiempo de paros acumulados a lo largo del tiempo y por último se analiza la producción afectada por dichos paros, al determinar la diferencia entre el inventario teórico y real del taladro industrial. El modelo permite analizar aún más el efecto del tiempo de los paros al determinar el inventario en proceso acumulado entre el taladro industrial y la máquina del proceso siguiente.

### Plataforma de simulación

En la figura 4 se presenta la plataforma de simulación desarrollada en el software Vensim Ple. La plataforma de simulación está conformada por tres secciones. En la sección "a" de la figura 4, se registra la información de frecuencia y tiempo de paro para cada mantenimiento considerado en la simulación, para este caso, se registran entre 8 y 12 datos. En la sección "b" de la figura 4 está contenido el modelo desarrollado, en el cual se presentan los flujos de producción, los niveles de inventario acumulado y las variables de interés para su análisis. En la sección "c" de la figura 4, se presentan gráficamente los resultados de dichas variables a lo

largo del tiempo, esto ayuda visualmente a analizar los principales escenarios de simulación. En la medida en que se realiza la simulación se pueden interpretar los datos de los diferentes escenarios.

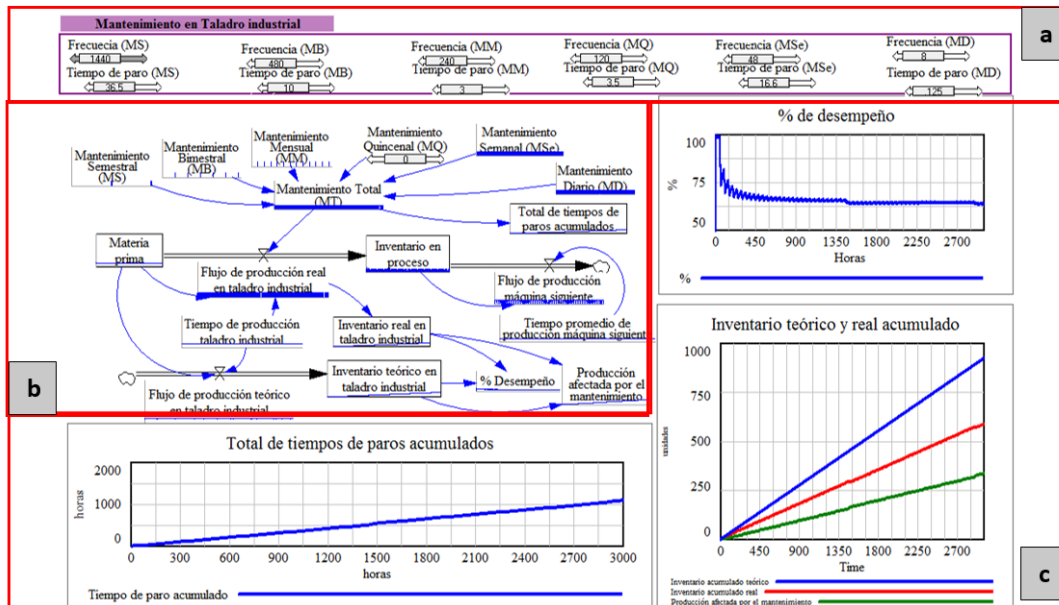


Figura 4 Simulación del modelo presente para el taladro industrial.

### Representación matemática de los tiempos de paro de mantenimiento

La programación de los paros está representada por las variables: Mantenimiento Semestral (MS), Mantenimiento Bimestral (MB), Mantenimiento Mensual (MM), Mantenimiento Quincenal (MQ), Mantenimiento Semanal (MSe), Mantenimiento Diario (MD); al final todos estos tiempos se totalizan en la variable Mantenimiento Total (MT). Tal y como se mencionó antes, es necesario incorporar tanto la duración del tiempo de paro como su frecuencia de ocurrencia. Esto se logra por medio de la función Pulse Train, esta función hace que, al valor usual de la variable, se le agregue un determinado valor durante un periodo; luego la variable vuelve a su valor normal y es posible observar el efecto **PULSE** sobre otras variables. En el programa Vensim Ple, esta función es expresada por medio de cuatro argumentos: (*start*, *duration*, *repeattime* y *end*).

Los argumentos son parametrizables con los datos de: (*Frecuencia*, *Tiempo de paro*, *Frecuencia* y *fin de simulación*).

El parámetro de *Frecuencia* establece cada cuanto se presentará el paro, mientras que el parámetro *Tiempo de paro* establece su duración, el parámetro *fin de simulación* indica hasta que periodo de tiempo se pretende analizar el entorno de simulación. Al final, esta función se multiplica por el tiempo de producción del taladro industrial, para que el paro programado tenga la altura igual a este tiempo. Esto es necesario, ya que para lograr la afectación en el flujo de producción real se le debe restar el tiempo generado por los paros de mantenimiento. A continuación, se ejemplifica en figura 5 la función Pulse.

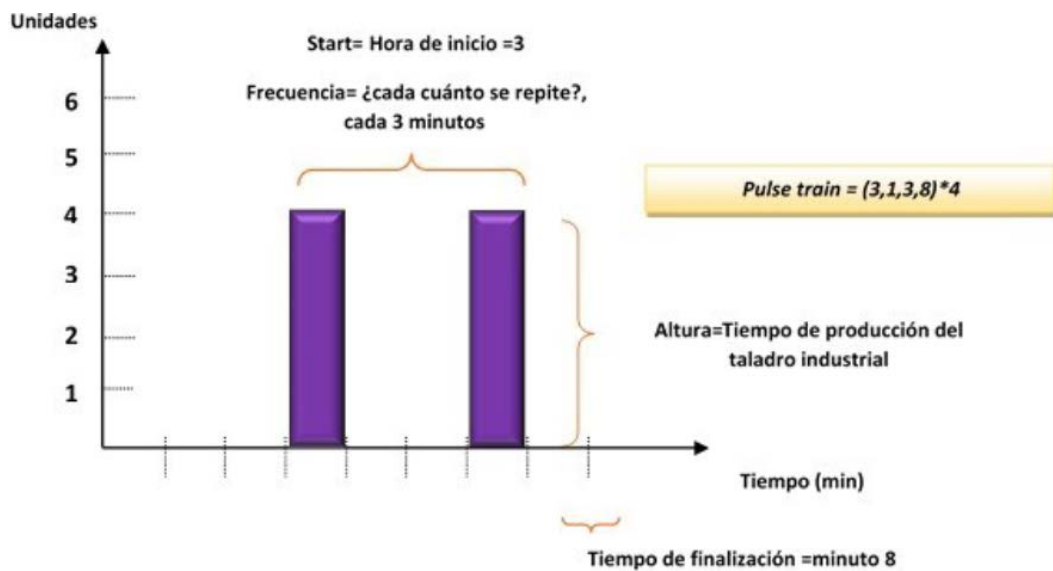


Figura 5 Ejemplo de la función Pulse.

De la figura 5, se observa que cada 3 minutos hay un pulso de 1 minuto y se repite hasta el minuto 8, por lo tanto, dado a su frecuencia únicamente se registran dos pulsos. Estos pulsos indican que hay una afectación en el lapso definido por el tiempo de producción. Bajo esta analogía la expresión matemática de los paros de mantenimiento se presenta en ecuaciones 1 a la 6.

$$I \text{ then else } (\text{Tiempo de paro}_{MS} = 0, 0, \text{Pulse train}(\text{Frecuencia}_{MS}, \text{Tiempo de paro}_{MS}, \text{Frecuencia}_{MS}, 3000)) \quad (1)$$

$$I \text{ then else } (\text{Tiempo de paro}_{MB} = 0, 0, \text{Pulse train}(\text{Frecuencia}_{MB}, \text{Tiempo de paro}_{MB}, \text{Frecuencia}_{MB}, 3000)) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \textit{If then else} \left( \textit{Tiempo de paro}_{MM} \right. \\ & = 0, 0, \textit{Pulse train}(\textit{Frecuencia}_{MM}, \textit{Tiempo de paro}_{MM}, \textit{Frecuencia}_{MM}, 3000) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \textit{If then else} \left( \textit{Tiempo de paro}_{MQ} \right. \\ & = 0, 0, \textit{Pulse train}(\textit{Frecuencia}_{MQ}, \textit{Tiempo de paro}_{MQ}, \textit{Frecuencia}_{MQ}, 3000) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \textit{If then else} \left( \textit{Tiempo de paro}_{MSe} \right. \\ & = 0, 0, \textit{Pulse train}(\textit{Frecuencia}_{MSe}, \textit{Tiempo de paro}_{MSe}, \textit{Frecuencia}_{MSe}, 3000) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \textit{If then else} \left( \textit{Tiempo de paro}_{MD} = \right. \\ & 0, 0, \textit{Pulse train}(\textit{Frecuencia}_{MD}, \textit{Tiempo de paro}_{MD}, \textit{Frecuencia}_{MD}, 3000) \end{aligned} \quad (6)$$

Se observa en las ecuaciones 1 a 6, que se ha considerado agregar la función *If then else*, esta función es una restricción la cual indica que, si no hay registrado ningún tiempo de paro, entonces no se registra ninguna función, de lo contrario, se activa inmediatamente la función *pulse train*.

Hasta el momento lo realizado identifica el potencial de una herramienta como lo es Vensim Ple para aplicaciones en la ingeniería industrial como lo es el mantenimiento y la apertura que se tiene para el desarrollo de las nuevas tendencias para el aprovechamiento de herramientas en temáticas dentro de la ingeniería. En la siguiente sección se muestran las gráficas obtenidas de la simulación del modelo para el taladro industrial en su mantenimiento correspondiente.

A continuación, se presentan los escenarios de simulación para las propuestas de mantenimiento en el taladro industrial, cuyo análisis se lleva a cabo por medio de la herramienta de Vensim Ple, considerando las variables de control establecidas para el caso.

### 3. Resultados

Como parte de los resultados se generan gráficos relacionados con cada uno de los escenarios presentes en el mantenimiento de un taladro industrial y éstos muestran cada etapa en donde se involucra el tiempo como factor de los sistemas

dinámicos y con lo que dio pauta para el desarrollo de este trabajo en el ámbito de simulación por medio de Vensim Ple para aplicaciones específicas de la ingeniería industrial, basándose en aspectos generales e ideales para el caso mostrado.

Para el escenario 1 y 3, mostrados en la figura 6, el total de tiempos de paros es muy similar, acumulando un total de 460 y 380 horas respectivamente. Hay una diferencia notoria si este resultado es comparado con el escenario 2, ya que las horas acumuladas de paro, prácticamente se duplican alcanzando un total de 1120 horas, esto se debe principalmente a que, en el segundo escenario se ha considerado una modalidad de mantenimiento diferente a los otros dos escenarios, para esta propuesta se determinó realizar paros bimestrales con una duración de 10 horas, es decir que cada dos meses, habrá una interrupción de la jornada productiva de 10 horas, acumulando un total de 60 horas en un año. Por otro lado, el mantenimiento semanal incrementó en un 71% para el escenario 1 y un 79 % para el escenario 3, al pasar de 4.8 y 3.5 horas a 16.6 horas respectivamente. Esta condición afecta grandemente la disponibilidad del equipo.

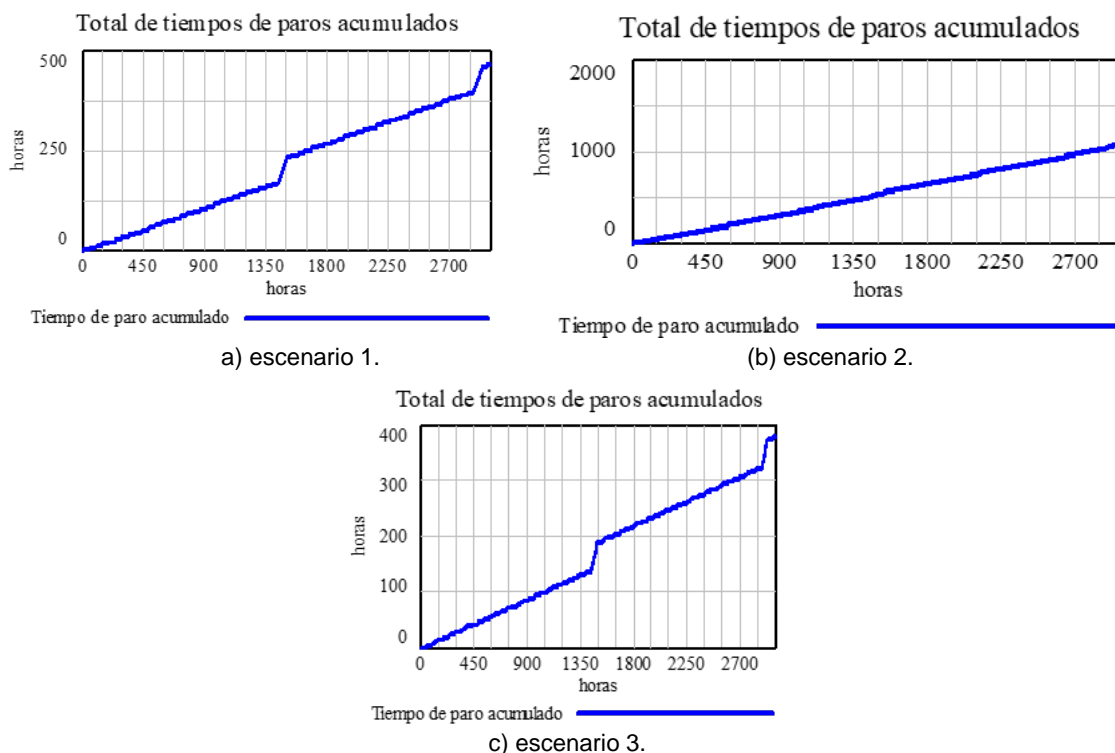


Figura 6 Total de tiempos de paros acumulados.

Una vez analizado el comportamiento de los tiempos de paros, en la figura 7, es de esperarse que el % de desempeño se comporte de manera muy similar. Para el escenario 1 y 3 los porcentajes de desempeño están por encima del 80%, lo cual se considera aceptable; sin embargo, el porcentaje de desempeño para el escenario del caso 2, su % baja hasta niveles de 72% y a pesar de que no es un valor muy bajo, éste representa un decremento del 15% aproximadamente en relación con los otros escenarios ya mencionados. Este porcentaje es un valor crítico para considerar cuando se evalúa los escenarios de mantenimiento, ya que nos indica el % de cumplimiento de la producción programada en función a los paros que se pueden presentar en el equipo, como en este caso, ocasionado por paros de mantenimiento.

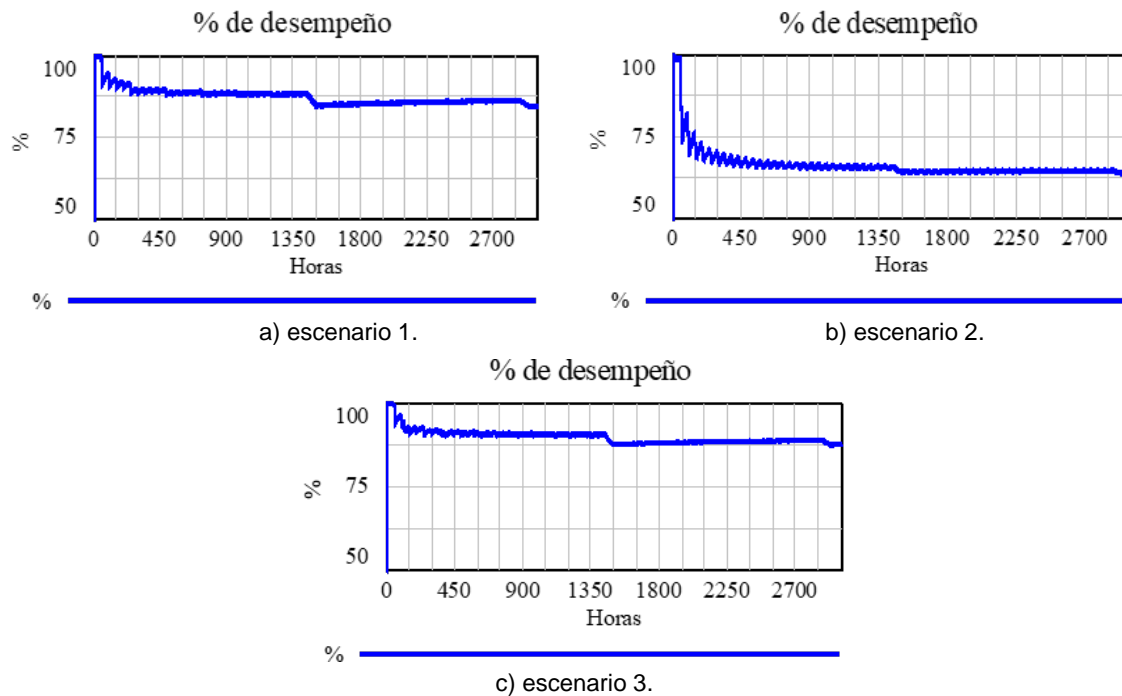


Figura 7 Desempeño (%).

Al incrementarse los tiempos de paros y al tener un porcentaje de desempeño bajo, es de esperarse que se vean afectadas las unidades a producir. En la figura 8 se presenta que el requerimiento teórico a cumplir es el mismo para los tres casos, es necesario producir 920 unidades en un ciclo de un año. Para el escenario 1, se observa que hay una afectación del 15% en la producción que teóricamente se

debería producir, generando que la cantidad de piezas afectadas sea de 140 unidades. Por otro lado, para el escenario 2, se genera una afectación del 36% en la producción teórica, es decir que se dejan de producir 333 unidades. Finalmente, el escenario 3 cuenta con el porcentaje menor, con un 12%, lo que representa un total de 110 unidades afectadas por los paros programados del mantenimiento.

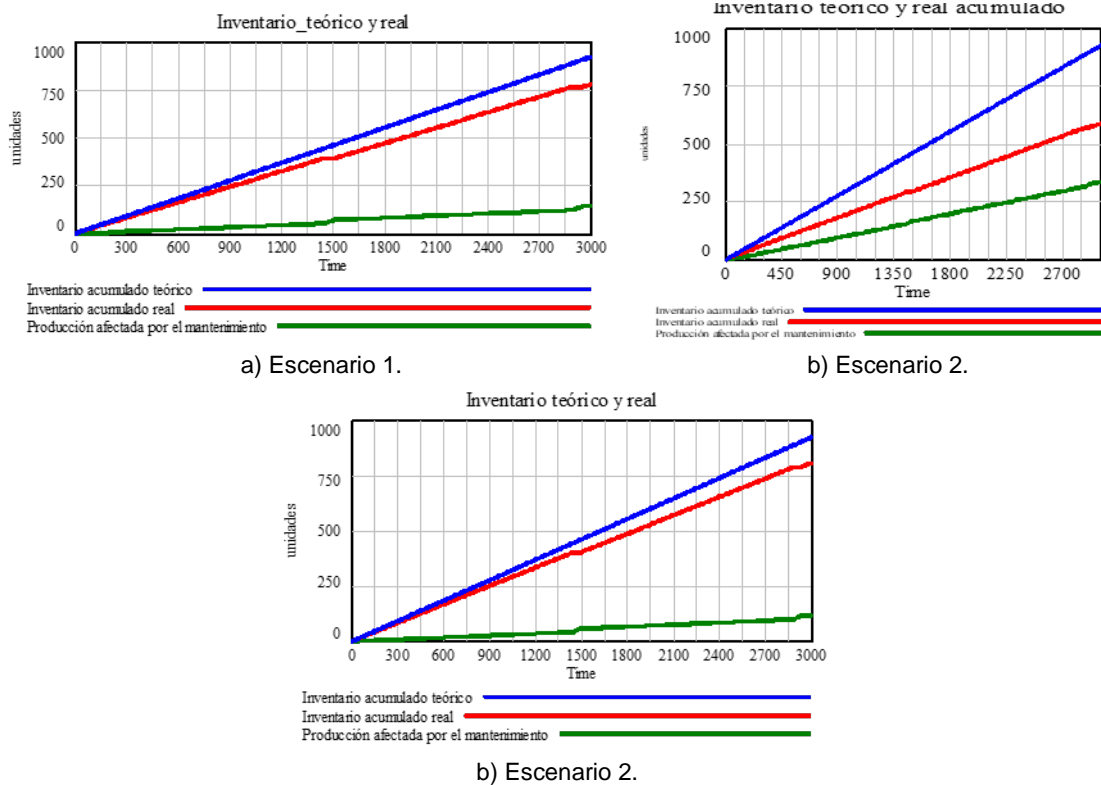


Figura 8 Inventario teórico y real del talado industrial e inventario pendiente.

De acuerdo con lo establecido en los párrafos anteriores se pueden establecer los escenarios, variables en el control y aplicación de Vensim Ple como una herramienta en el mantenimiento industrial, lo cual se describe en tabla 2.

Tabla 2 Escenarios y variables aplicables en el software Vensim Ple aplicado a un caso de mantenimiento industrial

Escenarios	Variables
Tiempos de paro acumulado	Horas semana/mes/bimestre
% de desempeño	Producción programada en función de paros
Inventarios	Unidades a producir

La tabla 2 tiene la ventaja de observar con mayor detenimiento las variables existentes en los casos de aplicación para el mantenimiento de un taladro industrial, con lo cual se logra determinar el impacto cuando estas variables son dependientes ya sea de mantenimiento preventivo, predictivo o correctivo, los cuales dependen de forma directa con el tiempo, el cual se utiliza para la evaluación dentro de los escenarios establecidos para la aplicación del software y el aprovechamiento de este mismo en los métodos de enseñanza-aprendizaje para las áreas de ingeniería enfocadas en el caso. Con estos escenarios y variables el estudiante podrá variar los parámetros y determinar la viabilidad de un mantenimiento en relación con la funcionalidad del elemento a evaluar y las tendencias que ofrece el análisis posterior a su aplicación. Y se tiene la ventaja de generar y obtener un gráfico con las vertientes que el estudiante logre identificar en los diferentes tipos de mantenimiento.

#### **4. Discusión**

En los resultados se logró identificar los escenarios que se interpretan como elementos fundamentales para el aprovechamiento de Vensim Ple como herramienta para analizar un caso en el área de mantenimiento industrial, en donde se localiza la importancia de esta herramienta como apoyo en el aprendizaje de los estudiantes en nivel superior en temáticas que involucran sistemas dinámicos, como se observa el mantenimiento como parte de un caso específico para analizarse por medio del software lo cual se logra debido a la aportación de información relacionada con el proceso y las condiciones controlables en función del tiempo, que facilitó el uso de la herramienta, ya que el sistema se comporta de forma dinámica.

De acuerdo con el desarrollo se logra enfatizar la importancia de verificar y validar variables de gran impacto dentro del caso de mantenimiento para establecer los criterios que se deben de considerar, desde el punto de teórico aplicable a lo práctico, para su aplicación y control dentro del software Vensim, ya que sin esa identificación no es posible extrapolarlo hacia los escenarios que se ubican en las aplicaciones de la herramienta.



Una tendencia con esta herramienta es la de analizar de manera consistente los diferentes tipos del mantenimiento de un caso en específico, como el tratado en este trabajo, para focalizar las vertientes tanto en mantenimiento preventivo como en el predictivo y correctivo. Con esto se da pauta a mejorar las condiciones en la preparación de clases para los estudiantes y que ellos observen el potencial que se tiene al utilizar la herramienta para la resolución y/o análisis de casos como parte fundamental de un sistema dinámico.

## **5. Conclusiones**

Del trabajo realizado se establece que el sentido de hacer uso de herramientas, como lo es Vensim Ple, en aspectos de mantenimiento industrial favorece el aprovechamiento para la mejora en enseñanza aprendizaje de las temáticas de la ingeniería industrial, del caso desarrollado se obtuvieron datos de gran importancia que permiten al estudiante adentrarse a estas temáticas y visualizando que existen otras factores que logran enriquecer su desarrollo académico y profesional con elementos reales y permisibles de la ingeniería.

Parte de los propósitos de este trabajo son identificar las ventajas que ofrece una herramienta computacional para evaluar un análisis de temáticas diferentes a las establecidas por el software, identificando el potencial y las áreas de oportunidad para escuelas inmersas en el aprendizaje de la ingeniería e igualmente la oportunidad a los estudiantes de utilizar nuevas técnicas de aprendizaje, en un lenguaje que los caracteriza en estos tiempos. Por otro lado, la importancia de abordar sistemas dinámicos con Vensim desde parámetros cuantitativos, como lo son formatos de mantenimiento para este caso de estudio, además, se logra adentrarse a otros ambientes de mejora para facilitar el estudio de la temática.

Con lo obtenido se pretende continuar con esta línea para identificar tendencias comparativas con el mercado educativo y escalarlo a lo profesional, ya que se cuenta con esta herramienta, la cual tiene los elementos necesarios para abordar al mantenimiento en sus diferentes fases, predictivo, preventivo, correctivo, igualmente con los resultados de este análisis se identifican los parámetros a controlar en cada caso dentro del mantenimiento a aplicar.

Algunos aspectos para resaltar para futuros desarrollos son: ampliar el campo de análisis en todas y cada una de las etapas del mantenimiento, mejorar el estado de frecuencias y su control, establecer un proceso de producción involucrado con todos los equipos de mantenimiento, formular algoritmos que faciliten la aplicación de la herramienta en cuestión.

Es importante resalta que el resultado obtenido en la aplicación de la herramienta en temas que no se habían contemplado, los estudiantes generan interés por aplicar nuevas tecnologías en su desarrollo académico y posteriormente aplicarlo en lo profesional y contar cada día con nuevas herramientas de análisis y resolución de casos reales por medio de nuevas técnicas de aprendizaje, lo cual enriquece el trabajo dando pasos a nuevas alternativas de aplicación, en lo concerniente a la ingeniería industrial, y sus diversas temáticas enfocadas en la mejora continua de un equipo, sistema o proceso.

Para el caso en específico el modelo desarrollado es para una máquina en particular, por lo que el modelo es reproducible, al ajustar ciertos parámetros, para evaluar otros escenarios de otras máquinas, pero el contexto general sigue siendo el mismo: entradas, salidas, acumulaciones, flujos y parámetros.

Por último, no se debe olvidar que Vensim Ple solo es una herramienta más que se ha considerado para el estudio del mantenimiento industrial, más no un programa que resolverá los casos de mantenimiento, sirve para comprender el mantenimiento con sus frecuencias como un sistema físico que depende el tiempo, como uno de los parámetros del control de un sistema. La experiencia que ha dejado este análisis tiene la virtud de ser transmitido para llegar al sector educativo como al industrial para obtener mejoras en los procesos concernientes. Y generar líneas de desarrollo con el uso de la herramienta para enriquecer las temáticas que involucran sistemas dinámicos y que dependen de forma directa del tiempo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Axelrod, R. Advancing the art of simulation in the social sciences. In: R. Conte, R. Hegselmann and P. Terna (Eds.), *Simulating social phenomena* (pp. 21-40). Berlin: Springer. 1997.

- [2] Brinksma, E., A. Mader and A. Fehnker (2002). Verification and optimization of a plc control schedule. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer* 4 (1), 21–53. 2002.
- [3] Campuzano Bolarín F, McDonnel Ros L, Lario Esteban, FC. Bullwhip Effect Consequences according to Different Supply Chain Management Strategies: Modelling and Simulation. *Journal of Quantitative Methods for Economics and Business Administration*, Vol. 5, p.49-66. 2008.
- [4] John S, Naim MM, Towill DR. Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system, *International Journal of Manufacturing Systems Design*, Vol. 1-4, p.283–297. 1994.
- [5] Penkova M, *Mantenimiento y análisis de vibraciones*, Ciencia y Sociedad, vol. XXXII, núm. 4, pp. 668-678. ISSN: 0378-7680. 2007.
- [6] Sterman, D. *Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill Higher Education (ISBN 0-07-231135-5). 2000.
- [7] Andrade H., Lince E., Hernández A., Monsalve A. Evolución, herramienta software para modelado y simulación con dinámica de sistemas. *Revista de Dinámica de Sistemas* Vol. 4 Núm. 1 (abril 2010).

# **MICROACELERÓMETRO MEMS, DISEÑO, ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y ELECTROSTÁTICO**

## *MEMS MICROACCELEROMETER, DESIGN, STRUCTURAL AND ELECTROSTATIC ANALYSIS*

**José Luis González Vidal**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
*jlvidal@uaeh.edu.mx*

**Daniel Hernández Moedano**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
*dhmoedano@gmail.com*

**Francisco Morales Jiménez**

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
*ciscofran@gmail.com*

**Juan José Raygoza Panduro**

Universidad de Guadalajara  
*juan.raygoza@cucei.udg.mx*

### **Resumen**

En ese trabajo se describe el diseño de un microacelerómetro de bajo consumo de potencia con tecnología MEMS; se obtuvo un microacelerómetro de 159  $\mu\text{m}$  x 109  $\mu\text{m}$ . Se realizó un mesh por el método de elementos finitos, para su análisis estructural y electrostático, esto con el software COMSOL MULTIPHYSICS 5.1, para comprobar su eficiencia y buen funcionamiento. Debido a que es un sensor de movimiento inercial tipo capacitivo, su principal aplicación es en los disparadores de bolsas de aire de automóviles; el cual podría impactar en la industria automotriz y de consumo.

**Palabra(s) Clave:** MEMS, microacelerómetro, mesh, sensor capacitivo, sensor inercial.

### **Abstract**

*This paper describes the design of a low power consumption micro-accelerometer with MEMS technology; the dimensions of microaccelerometer computed were*

159x109  $\mu\text{m}$ , a mesh was obtained by the finite element method, for its structural and electrostatic analysis, this with the COMSOL MULTIPHYSICS 5.1 software, to verify its efficiency and good performance. The main application of microaccelerometers is in automobile airbag triggers, which could impact the automotive and consumer industries.

**Keywords:** *Capacitive sensor, Inertial sensor, MEMS, mesh, microaccelerometer.*

## 1. Introducción

Los primeros trabajos, en los cuales se realizó el grabado de materiales, se reportaron a mediados de los años 60 del siglo pasado [Nathanson y Wickstrom, 1965], dichos grabados se empezaron a utilizar para construir pequeños sistemas micromaquinados con partes móviles, por medio de las técnicas de grabado y eliminación de materiales utilizadas en la fabricación de circuitos integrados electrónicos; principalmente el grabado de silicio. Dando lugar a lo que posteriormente se conoció como sistemas microelectromecánicos (MEMS), Se puede entender que un MEMS es un sistema de ingeniería que contiene diminutos componentes, diseñados para realizar una función específica. [Bassous, 1978], [Nathanson y Wickstrom, 1965], [González, 2006], [Petersen, 1982], [Zhang y otros, 2017], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Basuwaqi y otros, 2017], [Maluf y Williams, 2004], [Vijay, 2006], [Wu y otros, 2017]. Con respecto a la aplicación de los MEMS, la mayoría de los automóviles cuentan con disparadores de las bolsas de aire, pero poca gente sabe que este disparador es un microacelerómetro, por lo que, es posiblemente la aplicación comercial más exitosa y famosa de los microacelerómetros. Desde el punto de vista mecánico, los microacelerómetros son sensores inerciales, los cuales detectan el cambio de velocidad de un vehículo y envían una señal eléctrica para que se infle la bolsa de aire. Desde el punto de vista eléctrico, los microacelerómetros son sensores capacitivos. La gran ventaja, es que se realiza una misma acción consumiendo una mínima fracción de la energía, son extremadamente veloces y precisos, pueden integrarse con electrónica convencional y permiten fabricar sensores de alta

resolución y ocupan un espacio muy reducido. [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Kuncar, Sysel y Urbanek, 2017], [Lee y otros, 2005].

El principio básico de funcionamiento de un acelerómetro, como su nombre lo dice, es la medición del cambio de velocidad con respecto al tiempo, ésta puede realizarse cuantificando la fuerza necesaria para acelerar un objeto de masa conocida, por medio de un sistema de resortes unidos a dicha masa y una escala para cuantificar el movimiento (figura 1). [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Lu y Yeh, 2017], [Marra y otros, 2018], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Zhang y otros, 2017].

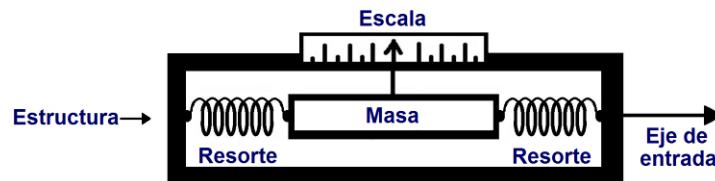


Figura 1 Modelo físico en que se basa el funcionamiento de acelerómetros integrados.

Para determinar el sistema del acelerómetro, el cual está basado en el sistema masa-resorte, se establece que, la deformación  $x(t) - y(t)$  del resorte, siendo  $x(t)$  desplazamiento del objeto vibrante,  $y(t)$  al desplazamiento de la masa  $m$  del sistema, se busca una relación entre esta deformación y la aceleración  $a$ ; se tiene que  $f$  es la fuerza aplicada por el resorte a la masa (ecuación 1).

$$f = ma \quad (1)$$

Considerando que  $g$  es la aceleración gravitacional, la ecuación 1 se puede representar mediante la ecuación 2.

$$f = mg \quad (2)$$

Es bien conocido que la ecuación 2 puede ser representado por la ecuación 3.

$$m\ddot{y} + ky = kx \quad (3)$$

Este análisis matemático se encuentra muy bien explicado en la literatura.

Para el caso de la geometría, la más usada se muestra en la figura 2, siendo esta base para la serie ADXL\*\* de empresa Analog Devices, el cual consta de un peine central, sujeto sólo a unos muelles rectangulares elásticos, anclados en cada uno de los extremos, de la cual emergen las vigas, mismos que actúan como placas centrales de capacitores diferenciales, junto con las vigas situadas en las partes superior e inferior de la figura 2, las partes negras representan las anclas, cuadros que fijan la estructura al sustrato. La masa de dicho modelo corresponde a la masa del peine y de las vigas, la constante elástica ( $k$ ) a la elasticidad de los muelles representadas en (3) [Hernández, 2009], [Analog, 2018], [Rana y Kaur, 2016], [Nevludov, Yevsieiev, Bortnikova y Miliutina, 2017].

Considerando que se trata de un sensor capacitivo, se puede considerar la deformación en una variación de capacitancia, que puede medirse eléctricamente con (4) [Petersen, 1982], [Khan y Shanmuganatham, 2017], [Beeby, Ensell, Kraft y White, 2004], [Basuwaqi y otros, 2017], [Maluf y Williams, 2004], [Vijay y Varadan, 2006], [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Hernández, 2009], [Hayt, Kemmerly y Durbin, 2011], [Shahbaz y otros, 2017].

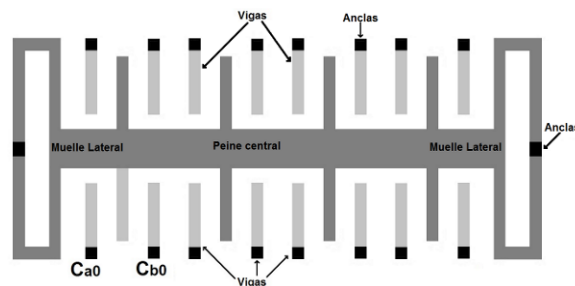


Figura 2 Geometría estándar de un acelerómetro.

Este diseño se realizó también considerando los parámetros eléctricos del dispositivo, debido a que su funcionamiento es igual a un capacitor de placas paralelas, el cual está formado por dos conductores planos de superficie  $S$  separados por una distancia  $d$  entre los que se establece una diferencia de potencial,  $+Q$  y  $-Q$  representan las cargas en cada placa,  $E$  el campo eléctrico y  $A$  el área de la superficie (figura 3). La capacidad de un condensador de placas paralelas depende su geometría, área y distancia, teniendo así la ecuación 4.

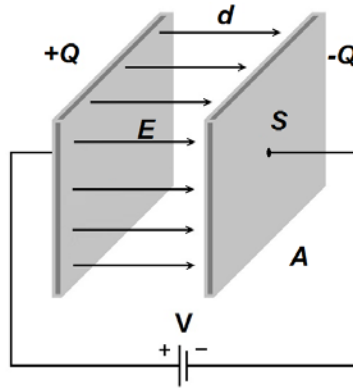


Figura 3 Geometría de un capacitor de placas paralelas.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (4)$$

Dónde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío ( $8.8541 \times 10^{-12} C^2/Nm^2$ ),  $A$  es el área de las placas que forman el capacitor y  $d$  es la distancia de separación entre ellas. Si se toma la distancia de separación entre placas mucho más pequeña que el área de las mismas ( $d \ll \sqrt{A}$ ), así mismo, en ecuación 4 se desprecia el efecto de borde y se considera que el campo eléctrico en el interior del capacitor es constante [Hernández, 2009], [Hayt, Kemmerly y Durbin, 2011], [Rashid, 2001], [Shahbaz y otros, 2017], [Rana y Kaur, 2016], [Nevludov, Yevsieiev, Bortnikova y Miliutina, 2017], [Lui y otros, 2018], [Dhineshkaarathi, Preeth y Kumar, 2017].

Por otra parte, el análisis por elementos finitos es un método utilizado en la simulación de un amplio rango de aplicaciones de ingeniería, debido a que es muy adecuado para la solución de ecuaciones diferenciales con condiciones de frontera conocidas y, es capaz de realizar el análisis de geometrías complejas, por medio de su división en un número finito de elementos con una forma más simple. Cada elemento se define por las características más relevantes del problema que se quiere resolver, considerando las condiciones de frontera y obteniendo los valores de nodos de cada función del elemento en particular. Después se consideran el equilibrio entre cada elemento y las condiciones de frontera globales y se representan por un conjunto de ecuaciones simultáneas, las cuales conforman una matriz muy compleja que puede ser resuelta por una computadora [Hernández,



2009], [Kittali, Sheeparamatti y Sheeparamatti, 2017], [Kuncar, Sysel y Urbanek, 2017], [Lu, 2017], [Nevludov yevsieiev, Bortnikova y Miliutina 2017], [Rana y Kaur, 2016], [Shahbaz y otros, 2017], [Vijay y Varadan, 2006], [Wu y otros, 2017], [Zhang y otros, 2017].

## 2. Métodos

Se desarrolló una estructura tipo microacelerómetro, como la que se muestra en la figura 4, la cual corresponde a un acelerómetro de tipo capacitivo interdigitado, en el cual, la masa inercial está constituida por las barras azules con dimensiones de  $3 \times 48 \mu\text{m}$ , con la variación de la distancia entre placas capacitivas y un muelle de barra simple (en amarillo) en cada extremo, además, con dimensiones de  $3 \times 100 \mu\text{m}$ , además, las barras fijas (en rojo y verde) que se encuentran en las partes superior e inferior, se encuentran aisladas eléctricamente de la masa inercial, y tienen dimensiones de  $1.6 \times 50 \mu\text{m}$ .

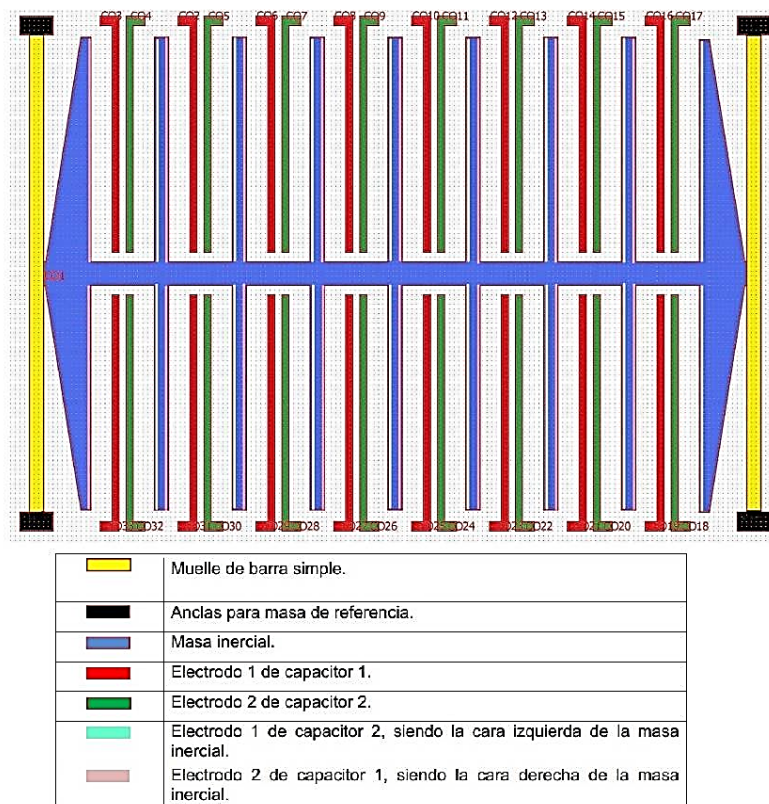


Figura 4 Acelerómetro MEMS capacitivo con muelle en forma de barras simples.

El diseño fue desarrollado con el programa COMSOL MULTIPHYSICS 5.1. Donde la masa inercial constituye una de las placas de los capacitores variables  $C_1(16\text{ nF})$  y  $C_2(16\text{ nF})$ , además de la terminal de salida. Las barras fijas rojas, constituyen la otra placa paralela de capacitor  $C_1$  (siendo la terminal más positiva) y están interconectadas entre sí; las barras verdes constituyen la otra placa paralela de capacitor  $C_2$  y también se encuentran interconectadas entre sí (constituyen la parte más negativa del sistema), esto con el fin de formar un capacitor variable con la masa inercial. El capacitor  $C_3(43\text{ nF})$ , está conformado por la capacitancia intrínseca entre cada una de las barras fijas (en rojo y verde); la figura 5 representa el circuito capacitivo equivalente.

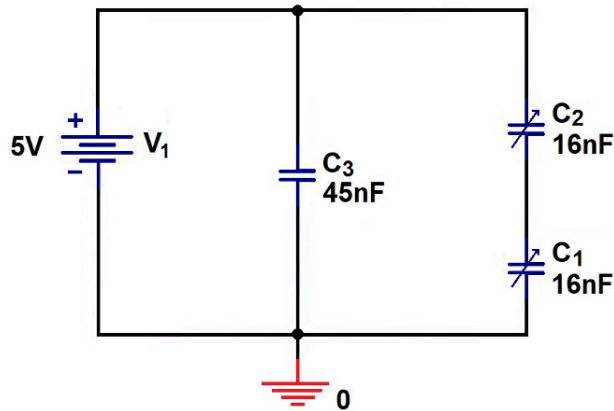


Figura 5 Circuito capacitivo equivalente.

Los muelles en forma de barra simple (en amarillo), se encuentran unidos a los extremos de la masa inercial(en azul), al igual los muelles están sujetos a sus extremos por unas anclas (en negro) a una masa de referencia, éstos tienen la función de proporcionar soporte mecánico a la mencionada masa, de tal forma que cuando la masa inercial se desplaza sobre el eje x, su deformación es proporcional a la aceleración aplicada, después de cierto tiempo, el sistema regresa a su estado estable, debido a este efecto, los capacitores  $C_1$  y  $C_2$  se consideran capacitores variables; la simulación del movimiento de la masa inercial en presencia de una aceleración positiva o negativa. La potencia disipada por el dispositivo es de 138 pW. La tabla 1 resume las características del microacelerómetro diseñado.

Tabla 1 Características generales del acelerómetro interdigitado de la figura 13.

Propiedad	Magnitud	Unidades
Masa	185	Mg
Constante de resorte k	$1.4e^{-6}$	N/m
Capacitancia $C_1$	16	(nF)
Capacitancia $C_2$	16	(nF)
Capacitancia $C_3$	45	(nF)
longitud en X	159	$\mu\text{m}$
Longitud en Y	109	$\mu\text{m}$
Longitud en Z	20	$\mu\text{m}$
Potencia disipada	138	pW

### 3. Resultados

Una vez diseñado microacelerómetro, se procedió su análisis estructural y electroestático. En la figura 6 se muestra los puntos donde las partes móviles del sistema presentan mayor esfuerzo mecánico, la magnitud de dicho esfuerzo está definida por las líneas en forma de ondas, cuya equivalencia se encuentra en la parte derecha de la figura 6; este esfuerzo es producido por el desplazamiento de sus partes móviles (figura 7), este comportamiento obedece a la mecánica newtoniana, donde cualquier masa se opone a los cambios de movimiento en ella, esto es, si está en reposo tratará de permanecer en reposo hasta que alguna fuerza cambie este estado, si se encuentra en movimiento tratará de permanecer en movimiento hasta que alguna fuerza cambie este estado.

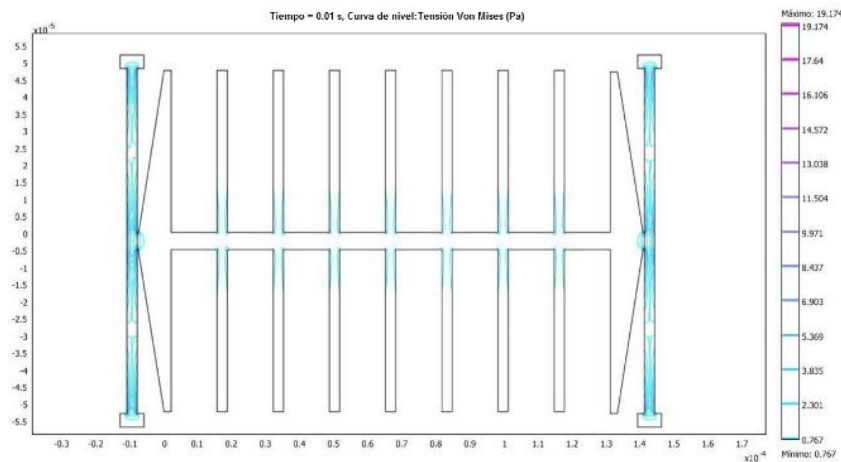


Figura 6 Esfuerzos mecánicos del material.

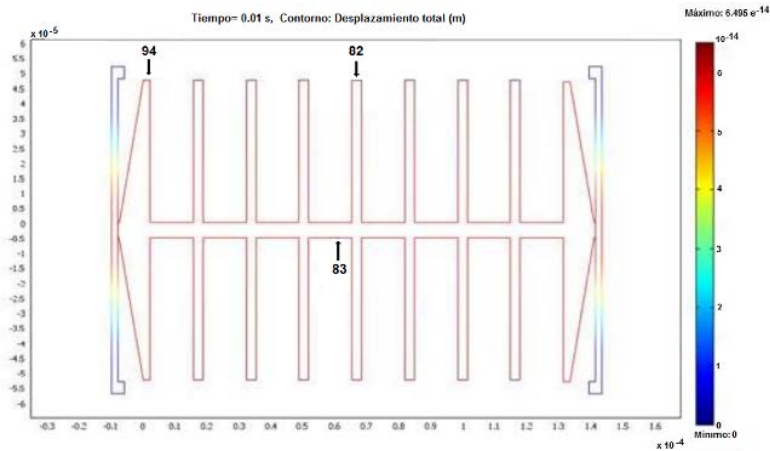


Figura 7 Desplazamiento de la masa inercial.

En la gráfica de la figura 8, se puede observar el fenómeno mencionado y la reacción de este sistema cuando se aplica una fuerza, ésta es aplicada como una aceleración sobre el eje de las ordenadas y su forma de onda obedece a un escalón, tomando en cuenta que el sistema está en reposo y que la aceleración es positiva.

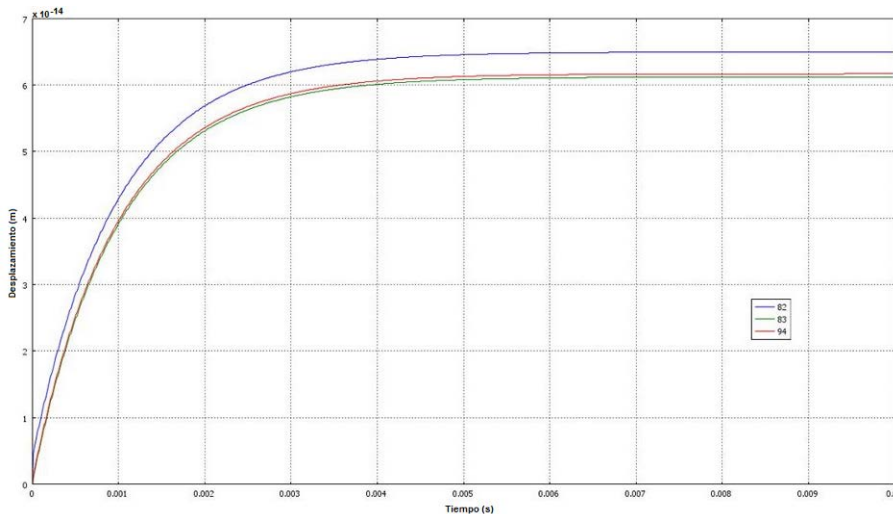


Figura 8 Comportamiento del sistema de masa inercial.

En figura 7, el desplazamiento total del sistema, pero de igual manera se muestran los puntos de los cuales se obtuvieron los datos de desplazamiento para la gráfica de la figura 8; en esta gráfica se toman solo tres puntos (82, 83 y 93) como muestra representativa del comportamiento del sistema, esto es debido a que el análisis por

elementos finitos, que es el tipo de simulación que se lleva a cabo para este sistema genera alrededor de 18,088 elementos de arista, esto significa que para el análisis, la geometría mecánica del sistema es fraccionada (meshing) en más de 18,000 partes tal como se muestra en la figura 9.

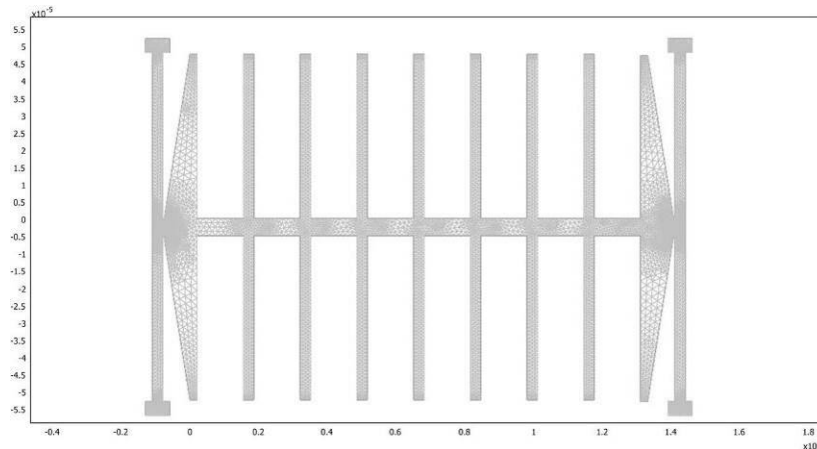


Figura 9 Geometría mecánica fraccionada (meshing) del sistema.

La distribución electrostática está ilustrada en la figura 10, en ella se puede observar más a detalle el voltaje que existe en la geometría y, en cada uno de los puntos designados por la malla de elementos finitos; además se anexan al análisis, las partes fijas a la masa de referencia como lo son los electrodos, también se coloca un cuadro alrededor de la geometría, este representa el gas en el que se encuentra contenido el acelerómetro, en este caso es aire.

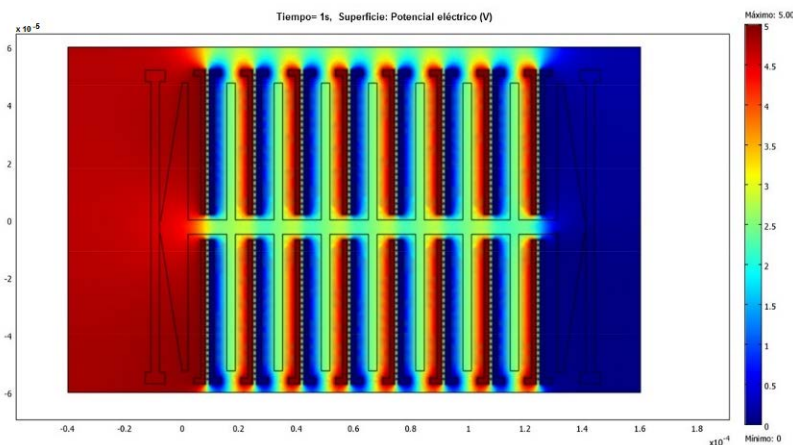


Figura 10 Distribución electrostática.

La gama de colores que presenta la figura 10 corresponden a un valor de voltaje cuya escala se muestra en el extremo derecho, en ésta, la masa inercial se encuentra en reposo, dicho de otra manera la masa inercial y la masa de referencia poseen la misma aceleración, así pues la distribución electrostática es uniforme dentro de la simulación, donde la terminal positiva son las barras rojas internas en la geometría, la parte negativa las barras internas en azul, donde estos colores representan los dos extremos del valor voltaico que se aplica directamente de la batería, la masa inercial nos representa el electrodo de salida y el valor de interés como salida es el de su parte media, representado con un color verde azulado y que indica un valor aproximado de entre 2 y 2.5 V; aun cuando la masa inercial se encuentra en la parte central de los electrodos su valor no es medio, esto se debe a que el campo electrostático en el aire, con condiciones normales decrece con el cuadrado de su distancia esto con base en la ley de coulomb.

En la gráfica de la figura 11 se muestra más a detalle el comportamiento de la carga electrostática en la masa inercial, en esta se puede ver que tiene un comportamiento cuadrático, aun cuando el desplazamiento de la masa es de apenas  $6.49 \times 10^{-14}$  m, existe una variación de 30 mV.

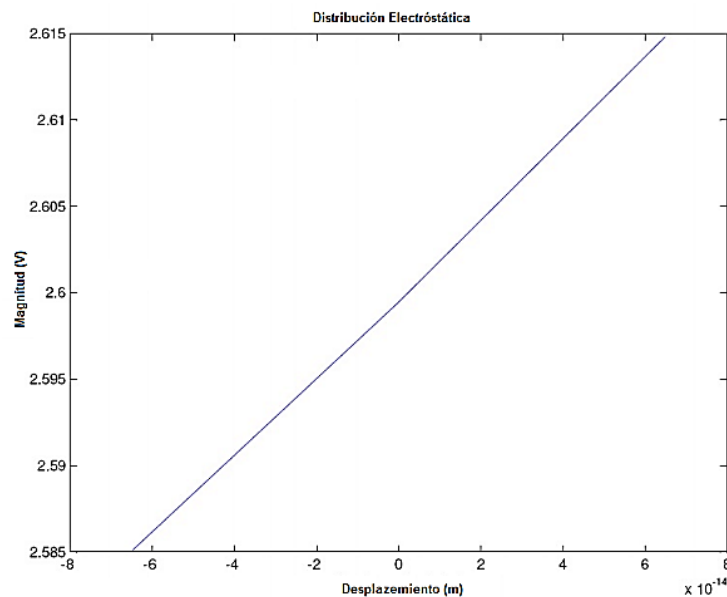


Figura 11 Distribución electrostática de la masa inercial sometida a una aceleración positiva y negativa de 70 g.

## 4. Discusión

El acelerómetro diseñado tipo capacitivo interdigitado, tiene la característica principal de que sus componentes están dispuestas para que varíe la distancia entre las placas capacitivas y un muelle de barra simple anchado en los extremos; Se desarrolló con el software COMSOL MULTIPHYSICS 5.1 y se le realizó un mesh, el cual arrojó un sistema fraccionado de 18,000 partes para su análisis por el método de elementos finitos, la simulación de los esfuerzos mecánicos de la figura 6 y del desplazamiento que se muestra en la figura 7, denota la flexibilidad del sistema; para el caso del desplazamiento de la masa inercial en este caso se indicaron los puntos 82, 83 y 93 y el tiempo en que alcanza la estabilidad figura 8. Por último, el análisis electrostático realizado a la estructura del acelerómetro, demuestra que es la mencionada distribución electrostática se distribuye de manera uniforme y gradual de izquierda a derecha (figura 10), donde el color rojo indica la parte más positiva y la región azul, la parte más negativa, dicha distribución de color se aplica para las barras del dispositivo.

## 5. Conclusiones

Por sus características los MEMS han ocupado un lugar clave en la industria automotriz y de consumo. Principalmente su aplicación como microsensors interdigitado tipo capacitivo. En este caso el microacelerómetro de  $159 \times 109 \mu\text{m}$ , donde los muelles de barra simple (en amarillo) miden  $3 \times 50 \mu\text{m}$  cada una; las barras azules miden  $3 \times 48 \mu\text{m}$ . y las barras fijas rojas y verdes miden  $1.6 \times 50 \mu\text{m}$  cada una. La potencia disipada por el dispositivo es de 138 pW, esta potencia es muy pequeña debido a las dimensiones del dispositivo y, se encuentra debajo de los valores reportados en la literatura. El microacelerómetro se analizó desde el punto de vista estructural y electrostático, debido a que es un sensor capacitivo, con variación de distancia entre placas. Se realizaron experimentos con distancia variable tipo barra simple y se observó que es de fácil caracterización y estructura sencilla, sin embargo, nos proporciona un rango limitado de movimiento, esto debido a su geometría y las propiedades del material; la simulación arrojó un mesh de 18,088

elementos. Para el análisis de estas microestructuras se realizaron simulaciones con el programa COMSOL MULTIPHYSICS 5.1.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Analog Devices (2018). <http://www.analog.com> (Analog Devices) <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems/accelerometers.html>.
- [2] Bassous, E. (1978). Fabrication of Novel Three Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (110) Silicon. *EEE Transactions on Electron Devices*, 25(10), pp. 1178-1185. doi:10.1109/T-ED.1978.19249.
- [3] Basuwaqi, A., Khir, M. H., A. Y. Ahmed, A., Rabih, A. S., Mian, M. U. y Dennis, J. O. (2017). Effects of Frequency and Voltage on the Output of CMOS-MEMS Device. 2017 IEEE Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics and Electronics (PrimeAsia). Kuala Lumpur, Malasia: IEEE. doi:10.1109/PRIMEASIA.2017.8280361.
- [4] Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M. y White, N. (2004). *MEMS Mechanical Sensors*. Norwood, MA, EE.UU., Artech House, Inc.
- [5] Dhineshkaarthi, K., Preeth, S. L. y Kumar, R. (2017). MEMS Cantilever Based Identification of Carcinogenic MZN. 2017 International Conference on Electrical, Instrumentation and Communication Engineering (ICEICE2017) pp. 1-4, Karur, India: IEEE. doi:10.1109/ICEICE.2017.8191863.
- [6] González-Vidal, J. L. (2006). *Aplicación de Estructuras Micro-Electro-Mecánicas (MEM's) con Tecnología MOS, para Sensores de Parámetros Físicos*. tesis doctoral. Ciudad de México, México: Tesis doctoral, CINVESTAV-IPN.
- [7] Lee, S., Nam, G.-J., Chae, J., Kim, H. y Drake, A. J. (2005). Two-Dimensional Position Detection System with MEMS Accelerometers, Readout Circuitry, and Microprocessor for Padless Mouse Applications. (IEEE, Ed.) *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 13(10), pp 1167 - 1178. doi:10.1109/TVLSI.2005.859473.
- [8] Khan, A. S. y T. Shanmuganatham (2017). Arc-Shaped Cantilever Beam RF MEMS Switch for Low Actuation Voltage. *Proceedings of 2017 IEEE*



- International Conference on Circuits and Systems (ICCS 2017), pp. 302-305. IEEE. doi:10.1109/ICCS1.2017.8326009.
- [9] Hayt, W., Kemmerly, J. y Durbin, S. (2011). *Engineering Circuits Analysis* (8a ed). Nueva York, EE.UU., McGraw Hill.
- [10] Hernández, D. (2009). *Desarrollo de Prototipos para Acelerómetros MEMS*, Tesis de maestría, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.
- [11] Kittali, R. M., Sheeparamatti, B. G. y Sheeparamatti, A. (2017). Modeling and Analysis of MEMS Based Accelerometer in Simulink. *Smart Technologies for Smart Nation, 2017 International Conference On*, pp. 602-606. Bengaluru, India: IEEE. doi:10.1109/SmartTechCon.2017.8358442.
- [12] Kuncar, A., Sysel, M. y Urbanek, T. (2017). Calibration of Low-Cost Accelerometer and Magnetometer with Differential Evolution. *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. Brno, República Checa. IEEE. doi:10.1109/MILTECHS.2017.7988795.
- [13] Lu, C.-L. y Yeh, M.-K. (2017). Thermal Stress Analysis of Chip with Pressure Sensor Embedded in Accelerometer. *Electronics Packaging (ICEP), 2017 International Conference on*, pp. 540-543. Yamagata, Japón. IEEE. doi:10.23919/ICEP.2017.7939442.
- [14] Lui, X., Jiang, W., Zhao, L., Jia, C., Yu, M. y Jiang, Z. (2018). Liquid Packaging Effects on Piezoresistive MEMS Accelerometer. *Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 2018 IEEE International Symposium on*. Lake Como, Italia, IEEE. doi:10.1109/ISS.2018.8358133.
- [15] Maluf, N. y Williams, K. (2004). *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering, Second Edition, (2nd ed.)*. Norwood, MA, EE.UU., Artech House Inc.
- [16] Rashid, M. H. (2001). *Power Electronics Handbook*. Pensacola, Florida, EE.UU., Academic Press.
- [17] Rana, D. y Kaur, M. (2016). Design and Simulation of CMOS MEMS Accelerometer Behavioral Model. *Wireless Networks and Embedded Systems (WECON)*. Rajpura, India: IEEE. doi:10.1109/WECON.2016.7993427.

- [18] Marra, C. R., Ferrari, F. M., Langfelder, G., Tocchio, A. y Rizzini, F. (2018). Single Resonator, Time-Switched, Low Offset Drift z-Axis FM MEMS Accelerometer. *Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, 2018 IEEE International Symposium on, pp 1-4, Lago de Como, Italia, IEEE. doi:10.1109/ISISS.2018.8358116.
- [19] Nathanson, H. C. y Wickstrom, R. A. (1965). A Resonant-Gate Silicon Surface Transistor with High-Q Band-Pass Properties. *Applied Physics Letters*, 7(4), pp. 84-86. doi:doi.org/10.1063/1.1754323.
- [20] Nevludov, I., Yevsieiev, V., Bortnikova, V. y Miliutina, S. (2017). MEMS Accelerometers Production Technological Route Selection. Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2017 14th International Conference The, pp. 424-427, Lviv, Ucrania, IEEE. doi:10.1109/CADSM.2017.7916166.
- [21] Petersen, K. (1982). Silicon as a Mechanical Material. *Proceedings of the IEEE* > Volume: 70 Issue: 5, 70(5), pp. 420 - 457. doi:10.1109/PROC.1982.12331.
- [22] Shahbaz, M. A., Warsi, Z. H., Irshad, S. M., Irshad, S. T. y Jawed, S. A. (2017). Design and Analysis of CMOS MEMS Based Single Proof Mass Tri-axial Capacitive Accelerometer with Readout Integrated Circuit. *Electrical Engineering and Computing Technologies (INTELLECT)*, pp. 1-8, Karachi, Pakistan. doi:10.1109/INTELLECT.2017.8277644
- [23] Vijay K. y Varadan, K. J. (2006). *Smart Material Systems and MEMS: Design and Development Methodologies*. Chichester, Inglaterra: Wiley y Sons Ltd.
- [24] Wu, W., Li, Z., Liu, J., Fan, J., y Tu, L. (2017). A Nano-G MEMS Accelerometer for Earthquake Monitoring. *Transducers 2017*, pp. 599-602, Kaohsiung, Taiwán.
- [25] Zhang, Y., Yu, Y., Zhang, Z. y Zhang, X. (2017). Structure and Design of Microgrippers: A Survey. *Cybernetics, Robotics and Control (CRC)*, 2017 2nd International Conference on, pp. 139-143. Chengdu, China. IEEE. doi:10.1109/CRC.2017.9.

# **IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE CIFRADO TRIVIUM EN UN SISTEMA EMBEBIDO**

## *AN IMPLEMENTATION OF THE TRIVIUM ENCRYPTION ALGORITHM IN AN EMBEDDED SYSTEM*

***Ishai Gun Roffe***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*Ishaigun@gmail.com*

***Oscar Alvarado-Nava***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*oan@azc.uam.mx*

***Eduardo Rodríguez Martínez***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*erm@azc.uam.mx*

***Andrés Ferreyra Ramírez***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*fra@azc.uam.mx*

### **Resumen**

En el presente trabajo se muestra la implementación de un sistema embebido capaz de cifrar datos a través del algoritmo TRIVIUM utilizando llaves creadas con criptografía de curvas elípticas. El sistema de cifrado fue implementado bajo el codiseño hardware-software donde las partes computacionalmente costosas fueron llevadas a módulos hardware y agregados a un sistema de cómputo tradicional CPU-RAM, donde un programa convencional se encarga de orquestrar el trabajo. Los resultados obtenidos muestran que es posible mejorar el rendimiento de una aplicación al utilizar el codiseño hardware-software y además se pueden tener otros beneficios al utilizar tecnologías de implementación que integran todos los módulos del sistema en un único circuito integrado, como un bajo consumo de energía, características ideales para sistemas inalámbricos, móviles o portátiles.

**Palabras Claves:** Criptografía, sistemas reconfigurables, sistemas embebidos.

## **Abstract**

The present work shows the implementation of an embedded system able to encrypt data using the TRIVIUM algorithm, with keys generated by means of elliptic curves. The system was designed using hardware-software codesing principles, where computationally expensive modules were implemented in hardware and added to a traditional computing system (CPU-RAM). A conventional program running on the computing system is responsible for orchestrating the work between hardware modules and the CPU. Obtained results show it is possible to improve an application performance by using hardware-software codesign. Additionally, several other benefits can be gained by integrating such solution in a system-on-a-chip such as low power consumption, ideal to wireless and portable systems.

**Keywords:** Cryptography, embedded systems, system on chip.

## **1. Introducción**

En la actualidad, la gran cantidad de información intercambiada entre varios dispositivos, así como el crecimiento de Internet, exigen el desarrollo de dispositivos que garanticen comunicaciones seguras, evitando que agentes malintencionados utilicen datos confidenciales. De hecho, la seguridad de la información es uno de los principales desafíos a abordar en el campo de la IT (*Information technology*). Debido a las fuertes limitaciones de recursos en algunas aplicaciones IT, se han propuesto algoritmos criptográficos que ofrecen la llamada criptografía ligera [Maimut, 2012]. El cifrado simétrico ligero se está generalizando cada vez más en aplicaciones de bajo consumo de energía como los sistemas portátiles e inalámbricos. Trivium es uno de los algoritmos de cifrado de flujo liviano con un perfil de hardware preseleccionado para el proyecto eSTREAM. Ha habido varias mejoras de Trivium con técnicas de paralelización [Wang, 2015] tanto para mejorar el tiempo de ejecución del cifrado como para reducir el consumo dinámico de energía.

Por otro lado, a medida que avanza la tecnología de sistemas en un chip (SOC, System On Chip), cada día es posible integrar más elementos de procesamiento en un solo circuito integrado, incluidos lógica reprogramable, varios núcleos de procesador, celdas de memoria y elementos de procesamiento analógicos. Ahora

los diseñadores de aplicaciones en SOC deben considerar no solo el diseño de hardware sino también el diseño de software. Un punto destacado de la tecnología de diseño de SOC ha sido el constante decremento del consumo de energía, mediante la reducción del tamaño de los elementos reconfigurables y de procesamiento, y la consecuente disminución del voltaje operativo, al tiempo que se mantiene el rendimiento del sistema [Pu, 2017][ Wang, 2015][ ul Haq, 2009].

### **Proceso de cifrado**

El cifrado o encriptación es el proceso reversible de alterar un mensaje mediante un algoritmo y una clave o llave, para que de esta forma sea ilegible. Para recuperar el mensaje original, se debe utilizar el mismo algoritmo y la clave correspondiente. De esta manera se puede tener un control sobre quién puede tener acceso a la información que se quiere mantener en secreto. Actualmente estos sistemas son muy utilizados para transmisión de mensajes en una red no segura.

Existen dos tipos de cifrado:

- Con el cifrado simétrico se necesita la misma llave tanto para cifrar como para descifrar.
- En el cifrado de llave pública, se utiliza una llave de libre acceso “pública” para cifrar la información y solo el que recibe la información cifrada puede descifrarla con una llave “privada”, las llaves son diferentes.

Existen también maneras seguras de establecer una llave simétrica a través de un canal no seguro, una de ellas es el método de Diffie-Hellman, donde intercambiando datos públicos y realizando operaciones con datos secretos, dos nodos pueden llegar a calcular una clave simétrica secreta para intercambiar datos cifrados mediante un algoritmo de cifrado simétrico de manera segura.

### **Criptografía de curva elíptica**

Uno de los principales problemas que tienen los algoritmos criptográficos asimétricos es la longitud de las llaves, estas generalmente son muy largas para poder ofrecer una buena seguridad, por ejemplo, algoritmos de amplio uso como el

RSA pueden llegar hasta los 1000 bits. Trabajar con cifras tan grandes puede ser computacionalmente costoso para procesadores con arquitectura de 32 o 64 bits y aún más para soluciones embebidas.

Para este proyecto se decidió utilizar criptografía de curva elíptica ECC (*Elliptic curve cryptography*) para realizar la resolución de las llaves ya que este nos ofrece la misma seguridad que los algoritmos anteriores usando datos de longitud mucho menor y aun así nos ofrece la misma seguridad [Fournaris, 2015]. Las curvas elípticas son polinomios con la forma mostrada en la ecuación 1, la cual genera una curva como la mostrada en la figura 1.

$$y^2 = x^3 + ax + b \quad \text{donde } a, b \in R \quad (1)$$

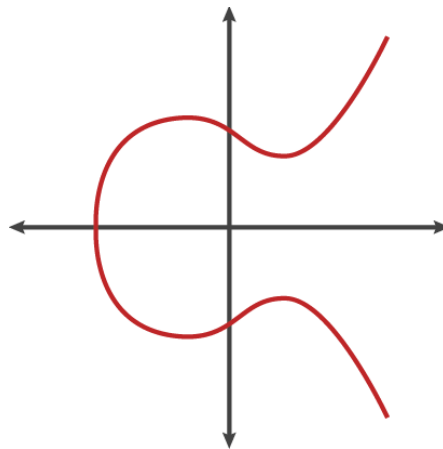


Figura 1 Curva elíptica.

Para poder ser utilizadas en criptografía, las curvas deben ser calculadas en módulo  $p$  (donde  $p$  es un número primo), la curva elíptica definida en  $Z_p = 0, 1, 2, \dots, p - 1$ , para  $p < 3$ , es el conjunto de todos los pares  $(x, y) \in Z_p$  que cumplan con  $y^2 = x^3 + ax + b \pmod{p}$ .

Tomando en cuenta un punto infinito  $\theta$  que cumple con la condición  $4a^3 + 27b^2 \neq \theta \pmod{p}$ , existen dos tipos de operaciones que se pueden realizar con dos puntos que pertenecen a la curva, la suma y la multiplicación. Dado un punto  $P = (x, y)$  en la curva elíptica, las operaciones aritméticas cumplen la propiedad de simetría expresada como el conjunto de identidades:

- $-P = (x, -y)$

- $P + \theta = P$
- $P + P = 2P$ .

La operación de suma se realiza de la siguiente manera. Sean  $P = (x_1, y_1)$ ,  $Q = (x_2, y_2)$ , y  $S = (x_3, y_3)$  puntos sobre la curva elíptica, con  $P \neq Q$ . Si  $S = P + Q$ , se cumplen las siguientes identidades:

- $S = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \bmod p$
- $x_3 = S^2 - x_1 - x_2 \bmod p$
- $y_3 = S(x_1 - x_3) - y_1 \bmod p$

Mientras que las operaciones de multiplicación se realizan. Sean  $P = (x_1, y_1)$ ,  $Q = (x_2, y_2)$ , y  $S = (x_3, y_3)$  puntos sobre la curva elíptica, con  $P = Q$ . Si  $S = P \times Q = 2P$ , se cumplen las siguientes identidades:

- $S = \frac{3x_1^2 + a}{2y_1} \bmod p$
- $x_3 = S^2 - x_1 - x_2 \bmod p$
- $y_3 = S(x_1 - x_3) - y_1 \bmod p$

Los puntos que forman parte de una curva elíptica junto con el elemento  $\theta$  crean grupos cíclicos al realizar la operación de multiplicación a un punto de la curva; al multiplicar un punto por sí mismo las suficientes veces da por resultado el elemento  $\theta$ ,  $dP = \theta$ . El número exacto de puntos dentro de una curva elíptica  $E$  ( $|E|$ ) está dado por el Teorema de Hasse:  $P + 1 - 2\sqrt{P} \leq |E| \leq P + 1 + 2\sqrt{P}$ .

Podemos ver que  $|E|$  tiene un valor cercano a  $P$ . El algoritmo de la curva elíptica basa su seguridad en la enorme dificultad para resolver el siguiente problema:  $P + P + \dots + P = dP = T$ .

### Resolución de llaves

El algoritmo de la curva elíptica que se utilizará es en particular el protocolo Diffie-Hellman para la resolución de llaves, esto nos permite conseguir una llave secreta sin que tenga que ser enviada del emisor al receptor.

El protocolo funciona de la siguiente manera: Dados una curva elíptica  $E$ , un número primo  $p$  y un punto  $P = (x_p, y_p)$ , todos datos públicos:

- El Emisor escoge cualquier entero  $a$  tal que  $a \in \{2,3,4, \dots, |E| - 1\}$ .
- El Emisor calcula  $A = aP = (x_A, y_A)$  y lo envía al Receptor.
- El Receptor escoge cualquier entero  $b$  tal que  $b \in \{2,3,4, \dots, |E| - 1\}$ .
- El Receptor calcula  $B = bP = (x_B, y_B)$  y lo envía al Emisor.
- El Emisor calcula  $aB = T_{Emisor}$ .
- El Receptor calcula  $bA = T_{Receptor}$ .

Al final podremos observar que  $T_{Emisor} = T_{Receptor}$ , por lo que cualquier componente de ambos vectores puede ser utilizada como llave secreta.

### Algoritmo TRIVIUM

TRIVIUM es un algoritmo de encriptación simétrica creado por Christophe De Canniere y Bart Preneel para el proyecto eSTREAM el cual se llevó a cabo entre los años 2004 y 2008. El algoritmo TRIVIUM está diseñado especialmente para ser implementado fácilmente en hardware [2], es altamente paralelizable y de licencia libre, por esos motivos fue seleccionado para este proyecto.

TRIVIUM es un algoritmo de cifrado de tipo *Stream Cipher*, esto quiere decir que es capaz de generar un *keystream* de tamaño  $2^{64}$  bits a partir de una llave privada de 80 bits y de un vector inicial de 80 bits. El algoritmo de cifrado se divide en dos partes; la inicialización del estado interno y la generación del *keystream*. El estado interno está formado por 288 bits.

El proceso de inicialización del estado interno  $s$  consiste en los siguientes pasos:

- Se copia la llave secreta  $K$  a las primeras 80 localidades del estado interno y se asigna cero a las localidades de 81 a 93:  $(s_1, s_2, s_3, \dots, s_{93}) \leftarrow (K_1, K_2, \dots, K_{80}, 0, \dots, 0)$ .
- Se copia el vector inicial  $IV$  a las localidades 94 a 173 del estado interno y se asigna cero a las localidades de 174 a 177:  $(s_{94}, s_{95}, s_{96}, \dots, s_{177}) \leftarrow (IV_1, IV_2, \dots, IV_{80}, 0, \dots, 0)$ .



- Se asigna cero a las localidades 178 a 285 y uno a las localidades 286 a 288 del estado interno:  $(s_{178}, s_{179}, s_{180}, \dots, s_{288}) \leftarrow (0, \dots, 0, 1, 1, 1)$

El proceso de generación de llave se hace una vez inicializado el estado interno  $s$  y se realiza con el algoritmo mostrado en la figura 2, donde la operación  $a + b$  equivale a la operación lógica OR, y la operación  $a \cdot b$  equivale a la operación lógica AND.

```
01 for i=1 to N do
02   t1 ← s66 + s93
03   t2 ← s162 + s177
04   t3 ← s243 + s288
05   zi ← t1 + t2 + t3
06   t1 ← t1 + s91 · s92 + s171
07   t2 ← t2 + s175 · s176 + s264
08   t3 ← t3 + s286 · s287 + s69
09   (s1, s2, s3, s4, ..., s93) ← (t3, s1, s2, s3, ..., s92)
10   (s94, s95, s96, s97, ..., s177) ← (t1, s94, s95, s96, ..., s176)
11   (s178, s179, s180, s181, ..., s288) ← (t2, s178, s179, s180, ..., s287)
12 end for
```

Figura 2 Generación de llave para keystream.

Al finalizar cada iteración, se obtiene bit del *keystream* al cual se le aplica la operación lógica OR-Exclusiva para el cifrado del texto.

Posteriormente se ejecuta el proceso de generación de *keystream* 1152 veces y se descartan los bits generados, una vez finalizado el proceso el estado interno  $y$  se encuentra listo para generar información válida.

### Algoritmo TRIVIUM paralelo

Por lo general los algoritmos de tipo *Stream Cipher* solo pueden generar un bit por ciclo, pero como se ha comentado, una de las ventajas del algoritmo de cifrado TRIVIUM es la posibilidad de paralelizar sus operaciones, por lo que es capaz de generar hasta 64 bits por ciclo.

Al analizar el algoritmo en la figura 2 se puede observar que en cada ciclo de generación del *keystream* se generan también tres valores  $t$ , en las líneas 02, 03, y 04, los cuales se utilizan tanto para generar el bit del *keystream* como para el estado inicial.

En estas primeras tres  $t$  se tienen por lo menos 64 bits del estado interno que no se utilizan antes de los dos valores que se requieren para calcular la respectiva  $t$  y que solamente se van recorriendo cada ciclo, por ejemplo de la  $s_1$  a la  $s_{66}$  para la  $t_1$ , se podrían aprovechar y generar más de un trio  $t$  por ciclo. Por ejemplo, para generar ocho bits por ciclo se debe generar ocho tríos  $t$ :

$$t_{j,k} = \{t_{j,1}, t_{j,2}, t_{j,3}, t_{j,4}, t_{j,5}, t_{j,6}, t_{j,7}, t_{j,8}\}, \quad j\{1,2,3\}$$

Como se muestra en la ecuación 2.

$$\begin{aligned} t_{1,k} &= s_{66-k} + s_{93-k} \\ t_{2,k} &= s_{162-k} + s_{177-k} \\ t_{3,k} &= s_{243-k} + s_{288-k} \text{ para } k \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\} \end{aligned} \quad (2)$$

De esta forma se generan ocho tríos  $t$  por ciclo, por lo tanto se pueden generar ocho bits de *keystream*  $z_{j,k}$  los cuales son utilizados para cifrar un byte del mensaje. Al terminar de generar el *keystream* también se debe generar los  $t$  que se introducirán al estado interno y deben ser ocho tríos también, como se muestra en ecuación 3.

$$\begin{aligned} t_{1,k} &= t_{1,k} + s_{91-k} \cdot s_{92-k} + s_{171-k} \\ t_{2,k} &= t_{2,k} + s_{175-k} \cdot s_{176-k} + s_{264-k} \\ t_{3,k} &= t_{3,k} + s_{286-k} \cdot s_{287-k} + s_{69-k} \\ s_1, s_2, s_3, s_4, \dots, s_{93} &= t_{3,1}, t_{3,2}, \dots, t_{3,8}, s_1, s_2, s_3, \dots, s_{85} \\ s_{94}, s_{95}, s_{96}, s_{97}, \dots, s_{177} &= t_{1,1}, t_{1,2}, \dots, t_{1,8}, s_{94}, s_{95}, s_{96}, \dots, s_{169} \\ s_{178}, s_{179}, s_{180}, s_{181}, \dots, s_{288} &= t_{2,1}, t_{2,2}, \dots, t_{2,8}, s_{178}, s_{179}, s_{180}, \dots, s_{280} \end{aligned} \quad (3)$$

Para  $k \in \{1,2,3,4,5,6,7,8\}$

Al introducir  $j$  tríos de bits al estado interno se tiene la ventaja adicional de que la inicialización de éste será mucho más rápida y en vez de tener que esperar 1152 ciclos solo tomará  $1152/j$  ciclos para inicializarse.

Se decidió que el módulo de TRIVIUM fuera diseñado para calcular 32 bits de *keystream* por ciclo, por lo cual la arquitectura del CPU deberá ser de 32 bits para obtener un mejor desempeño.

## 2. Métodos

### Codiseño hardware-software

Para la implementación del sistema de cifrado, se utilizó la metodología de co-diseño hardware-software. Esta metodología permite el desarrollo de sistemas donde las partes más costosas en cómputo de una aplicación son implementadas en hardware, dejando las menos costosas software. De esta forma, un programa ejecutado en un sistema de CPU-RAM puede delegar trabajo computacionalmente costoso a unidades implementadas en hardware de propósito específico. Este tipo de diseño tiene varias ventajas, las más importantes son mejorar el tiempo de ejecución de la aplicación. Otra ventaja importante es que se sigue aprovechando la gran flexibilidad que el software ofrece en el diseño de aplicaciones, así como el potencial paralelismo del hardware minimizando la complejidad de su diseño. Después de realizar un análisis de la aplicación, se decidió diseñar dos módulos de hardware, el TRIVIUM y el ECC, los cuales serán integrados a un sistema de cómputo CPU-RAM. La propuesta del codiseño se muestra en la figura 3.

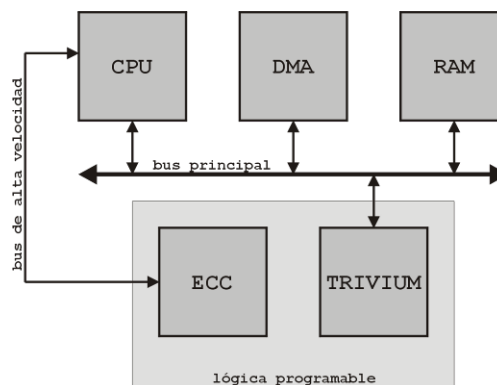


Figura 3 Diagrama a bloques del sistema digital propuesto.

El módulo marcado como CPU representa un procesador convencional, el cual puede contar con uno o varios núcleos. El módulo ECC (Curva Elíptica) implementa las operaciones de multiplicación de punto en la curva elíptica para la generación de la llave [Sutter, 2013][Qingxian, 2005]. El módulo TRIVIUM es la implementación del algoritmo paralelo de cifrado explicado en la sección 2B considerando las características de explicadas en [Jafarpour, 2011] y será el encargado del proceso

de cifrado. El módulo DMA (*Direct Memory Access*) o acceso directo a la memoria, permite al módulo TRIVIUM el acceso a la memoria principal para recibir los datos a cifrar y regresar los datos cifrados, de manera independiente al CPU.

Los módulos CPU, DMA, RAM y TRIVIUM están interconectados a través de un bus convencional. El módulo ECC se interconecta con el CPU por medio de un bus de alta velocidad. Esto se debe a que para el proceso de cifrado el módulo ECC será accedido solamente para la generación de la llave, mientras que el módulo TRIVIUM deberá realizar un mayor número de accesos a la memoria principal. Para acceder a los módulos de hardware desde un programa, el ECC será mapeado en memoria, mientras que el TRIVIUM será accedido a través del espacio de direcciones del DMA.

## **Software**

Un programa será cargado a la memoria principal y ejecutado en el CPU para realizar las siguientes actividades: inicialmente enviará los parámetros al ECC para que realice las operaciones necesarias para la generación de la llave. El programa esperará la señal de interrupción que indica que los resultados están listos para ser leídos por el CPU y ser llevados a la memoria principal.

Calculada la llave, el programa la envía al módulo de TRIVIUM, el cual la almacena en un registro. Ahora, el programa inicia la transferencia de datos a cifrar, desde un archivo alojado en un dispositivo de almacenamiento con acceso USB, hacia la memoria principal y de ahí hacia el módulo de TRIVIUM. Como esta transferencia se realiza a través del DMA, no es necesario direccionar los dispositivos, así, la lectura y escritura de la memoria principal del sistema se realiza de manera totalmente independiente al CPU. El programa también es el encargado de llevar los datos cifrados a un archivo alojado en el dispositivo de almacenamiento.

## **4. Resultados**

### **Implementación del sistema**

El sistema fue implementado en la tarjeta de desarrollo ZYBO de la compañía Xilinx. Esta tarjeta de desarrollo cuenta con el SoC (System on Chip) Zynq-

XC7Z010, el cual es un sistema embebido que combina entre otros recursos, una zona de lógica reconfigurable, un procesador incrustado con dos núcleos ARM Cortex-A9 a 650 Mhz, módulos de memoria DRAM y un módulo DMA para la comunicación entre a periféricos. Un esquema del sistema implementado en el Zynq se puede observar en la figura 4.

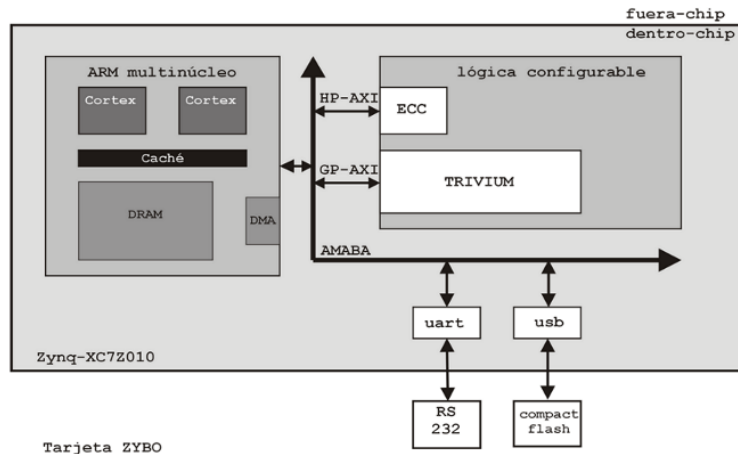


Figura 4 Sistema digital implementado en la tarjeta de desarrollo Zybo.

Para el desarrollo tanto del hardware como del software se utilizó el ambiente de trabajo Vivado de Xilinx. Vivado es un IDE o ambiente integrado de desarrollo para FPGAs de mayor capacidad y dispositivos que incluyan tanto la síntesis de alto nivel como el desarrollo de aplicaciones hechas en lenguajes de programación como C, C++ o Python. Los módulos ECC y TRIVIUM fueron desarrollados a través del lenguaje de descripción de hardware VHDL y encapsulados como dispositivos de propiedad intelectual, conocidos como IPs. Estos IPs fueron sintetizados en la zona reconfigurable del Zynq.

El CPU ARM contiene dos núcleos Cortex, memoria caché y bloques de memoria DRAM. Este CPU se conecta a través del bus AMABA (*Advanced Microcontroller Bus Architecture*) a los diferentes dispositivos. Existen dos tipos de puertos para conectar los IPs de la lógica configurable con el CPU: HP-AXI (High-Performance Ports) y GP-AXI (General-Purpose Ports), la diferencia radica en que los GP-AXI son direccionados por el DMA. El IP-ECC fue conectado al puerto de alta velocidad y el IP-TRIVIUM a un puerto de propósito general.

Se agregó un dispositivo UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) para utilizarla como consola del sistema, esto es, para que el sistema pudiera enviar y recibir cadenas de caracteres a través de un dispositivo RS-232.

En la figura 5 se muestra un esquema de interconexión de los módulos sintetizados por la herramienta Vivado, en la cual se pueden identificar los IPs desarrollados y la parte de procesamiento del Zynq, así como su interconexión.

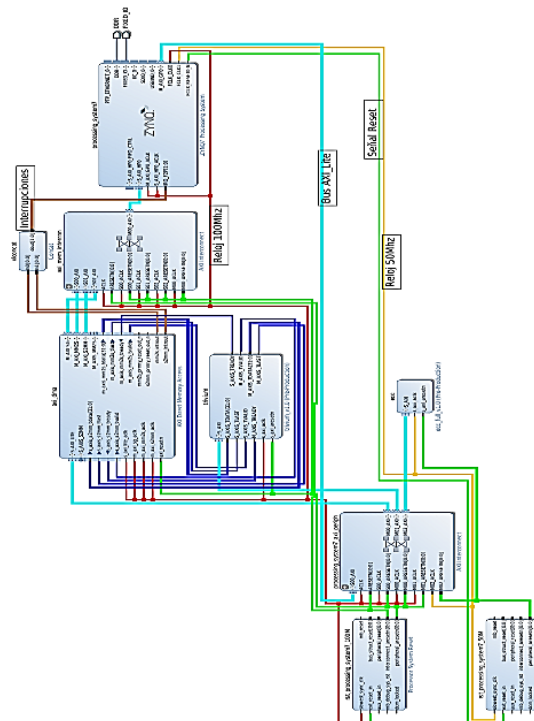


Figura 5 Esquema de interconexión entre las entidades de diseño del sistema digital.

## Software de la aplicación

El programa fue desarrollado en lenguaje C y a través de un compilador cruzado se llevó a la arquitectura objetivo ARM. Además, el programa fue enlazado de manera estática con módulos de biblioteca para la entrada y salida estándar, ofrecidas por Xilinx. Estos módulos de biblioteca incluyen funciones especializadas en lenguaje C para el acceso a los IPs, con definiciones como las siguientes:

- `Xil_Out32(dirección, dato)` → Escribe dato a una dirección del sistema, a cada IP se le asigna un espacio de direcciones.
- `Xil_In32(dirección)` → Lee un dato de una dirección del sistema.

El programa se encarga de llevar a cabo las tareas descritas en la sección 3B. Una tarea adicional que realiza el programa es contabilizar el tiempo de procesamiento de cada IP. Para ello, se utilizó la función de biblioteca XTime\_GetTime(), la cual es capaz de contabilizar el tiempo del CPU en microsegundos.

## 4. Discusión.

### Recursos utilizados

Los recursos utilizados de la lógica programable muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Recursos utilizados en la implementación del sistema digital.

LUT %	LUT's	FF %	FF's	BRAM %	BRAM's
<b>53.307</b>	9382	28.531	10043	3.333	2

Los recursos utilizados en la síntesis de los IPs incluyen LUT (*Look up tables*) tablas lógicas de verdad, FF (*Flip flops*) para registros y retención de señales y BRAM (*Block RAM*) bloques de memoria RAM los cuales son necesarios para la ejecución del programa.

### Tiempo de ejecución

Para comparar el rendimiento del sistema desarrollado (tabla 2), se programó el algoritmo TRIVIUM en C y se ejecutó en dos equipos con CPU de arquitectura x86 de gama media.

Tabla 2 Comparativa del tiempo de ejecución en tres arquitecturas diferentes.

	Intel 520M [μs]	AMD FX8350 [μs]	Zynq [μs]
	5876000	6687000	21388
	5905000	6715000	21392
	5934000	6700000	21380
<b>Promedio</b>	<b>5905000</b>	<b>6700666.67</b>	<b>21386.67</b>

El experimento consistió en codificar un archivo de un Megabyte de información y se contabilizó el tiempo de cifrado. Se realizó la misma prueba tres veces y se utiliza el promedio de estas como el resultado final.

Podemos considerar otra métrica comparativa si definimos el tiempo que toma codificar un Megabyte de información como  $t$ , podemos calcular la velocidad  $v$  de cifrado en Mb/s como  $v = 1/t$ , con lo cual se obtienen los resultados mostrados en la tabla 3.

Tabla 3 Comparativa del desempeño del sistema digital en tres diferentes arquitecturas.

Intel 520M [Mb/s]	AMD FX8350 [Mb/s]	Zynq [Mb/s]	
00.16930	00.14920	46.7581	

## 5. Conclusiones

Se puede observar una aceleración considerable al cifrar por medio del sistema embebido, esto es debido principalmente a que la parte computacionalmente más costosa del algoritmo TRIVIUM está diseñado en hardware.

Una estrategia para aumentar aún más el rendimiento de la aplicación sería sintetizar más de un módulo TRIVIUM y hacerlos trabajar de manera concurrente aprovechando tanto el inherente paralelismo del hardware como que el algoritmo de cifrado TRIVIUM es altamente paralelizable.

A pesar de que el Zynq es un sistema embebido de gama baja, es capaz de contener todo nuestro sistema desarrollado, sin embargo, las rutas de interconexión entre los CLB no son distribuidas de la manera adecuada y podrían generar problemas de sincronización. Este problema no se puede solucionar, aunque se reduzca la velocidad de operación de la lógica programable, el problema sólo se puede resolver utilizando una tarjeta con mayores recursos como por ejemplo la Zedboard de Xilinx.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Fournaris, A.P., Zafeirakis, I., Koulamas, C., Sklavos, N., Koufopavlou, O., "Designing efficient elliptic Curve Diffie-Hellman accelerators for embedded systems," 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp.2025-2028, 24-27 May 2015.
- [2] Jafarpour, A., Mahdlo, A., Akbari, A., Kianfar, K., "Grain and Trivium ciphers implementation algorithm in FPGA chip and AVR micro controller," 2011 IEEE



- International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (ICCAIE), pp.656-658, 4-7 Dec. 2011.
- [3] Maimut, D., Ouafi, K., "Lightweight Cryptography for RFID Tags," in IEEE Security & Privacy, vol. 10, no. 2, pp. 76-79, March-April 2012. doi: 10.1109/MSP.2012.43.
- [4] Pu, Y., Samson, G., Shi, C., Park, D., Easton, K., Beraha, R., Hadi, J., "Blackghost: An ultra-low-power all-in-one 28nm CMOS SoC for Internet-of-Things," 2017 IEEE Symposium in Low-Power and High-Speed Chips (COOL CHIPS), Yokohama, 2017, pp. 1-3. doi: 10.1109/CoolChips.2017.7946384.
- [5] Qingxian, W., "The application of elliptic curves cryptography in embedded systems," Second International Conference on Embedded Software and Systems, pp. 16-18, Dec. 2005.
- [6] Sutter, G.D.; Deschamps, J.; Imana, J.L., "Efficient Elliptic Curve Point Multiplication Using Digit-Serial Binary Field Operations," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no.1, pp.217-225, Jan. 2013.
- [7] Ul Haq, E., Hafeez, M. K., Khan, M. S., Sial, S., Riazuddin, A., "FPGA implementation of a low power, processor-independent and reusable System-on-Chip platform," 2009 International Conference on Emerging Technologies, Islamabad, 2009, pp. 337-341. doi: 10.1109/ICET.2009.5353150.
- [8] Wang, Z. C., Dai, Z. Bin, "High-speed realization of trivium based on multi-core cryptographic processor," 2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON), Chengdu, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ASICON.2015.7517000.
- [9] Wang, X., et al., "A multi-level collaboration low-power design based on embedded system," 2015 28th IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC), Beijing, 2015, pp. 186-190. doi: 10.1109/SOCC.2015.7406937.

# **MEDIDAS DE SIMILITUD BASADAS EN CARACTERÍSTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE RELACIONES TAXONÓMICAS**

## *SIMILARITY MEASURES BASED ON FEATURES FOR THE EVALUATION OF TAXONOMIC RELATIONSHIPS*

***Aimee Cecilia Hernández García***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*hernandez.aimee@outlook.com*

***Mireya Tovar Vidal***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*mtovar@cs.buap.mx*

***José de Jesús Lavalle Martínez***

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

***Ana Patricia Cervantes Márquez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*cervantes.patty@gmail.com*

### **Resumen**

En una ontología, la similitud semántica entre un par de conceptos es una forma de saber qué tan similares son en base a su significado, mediante el conocimiento de la distancia entre los conceptos o en base a las características de los conceptos. En esta investigación, se propone un algoritmo para la evaluación de relaciones taxonómicas en una ontología de dominio de Inteligencia Artificial (IA) a través de la medida de exactitud. Las medidas de similitud implementadas en este artículo se basan en conocimiento, y dentro de este grupo de medidas existen las medidas basadas en estructura: *Path*, *Wu-Palmer* y *Li*, y las medidas basadas en características: *cmatch*, *RE* y *Sánchez*. La exactitud de las relaciones taxonómicas de tipo “is-a” en las medidas implementadas es de un 92%. Con los resultados experimentales comparados con las respuestas de validación de un experto de dominio, el sistema coincide en un 90% de exactitud.

**Palabras Claves:** Ontologías, relaciones taxonómicas, similitud semántica.

## **Abstract**

*In an ontology, semantic similarity between a pair of concepts is a way to find out what so similar they are, this is based on their meaning by computing the distance between concepts or it is based on the characteristics of the concepts. In this paper, an algorithm is proposed for the evaluation of taxonomic relationships in a domain ontology of Artificial Intelligence (AI) through the accuracy measure. The measures of similarity implemented in this research are based on knowledge, and within this group of measures, there are measures based on structure: Path, Wu-Palmer and Li, and measures based on characteristics: cmatch, RE and Sánchez. The accuracy for the "is-a" taxonomic relationships for the measures implemented is 92%. With the experimental results compared to the validation responses of a domain expert, the system matches the 90% of accuracy.*

**Keywords:** *Ontology, semantic similarity, taxonomic relationships.*

## **1. Introducción**

Tim Berners Lee [Berners-Lee, 2001] plantea que la web semántica tiene como uno de sus propósitos dar un significado semántico a los datos de la web actual. Por lo que surge el interés de que las computadoras comprendan el lenguaje natural a través de representaciones semánticas. Una de las formas de representar ese conocimiento almacenado en los datos, en un área de interés, es a través de las ontologías. Específicamente en [Gruber, 1995] se define una ontología como “*una especificación explícita y formal de una conceptualización compartida*”. Las ontologías están formadas por conceptos o clases, relaciones, instancias, atributos, axiomas, restricciones, reglas y eventos. Además, las ontologías se pueden organizar en estructuras taxonómicas y no taxonómicas de conceptos de un área o dominio específico. Respecto a las clases y relaciones, cuando una clase A es una subclase de B, se dice que tiene una relación taxonómica, o una relación de tipo “is-a”. [Jiang, 1997] indica que cuando las relaciones semánticas requieren un análisis, existen muchos tipos de relaciones posibles que pueden considerarse, por ejemplo: jerárquica (is-a o hiperónimo-hipónimo, parte-todo, etc.), asociativa (causa-efecto), equivalencia (sinonimia), etc. Entre estas, la relación jerárquica representa el tipo

principal y más importante, y ha sido ampliamente estudiado y aplicado porque se acopla mejor a la vista cognitiva humana de la clasificación (taxonomía). Actualmente, existen propuestas para la generación automática de ontologías, el problema de estas propuestas es que difícilmente tienen una evaluación automática, haciendo complicada la medición de la calidad de los recursos semánticos que estos sistemas generan. La evaluación de ontologías consiste en medir la calidad de los recursos semánticos y tiene como objetivo facilitar la tarea del ingeniero de conocimiento o experto del dominio para la verificación de la calidad de la ontología. La evaluación de ontologías de manera manual normalmente requiere un consumo excesivo de tiempo en el proceso de evaluación, más aún si la ontología tiene un tamaño considerable de conceptos y relaciones semánticas. Una de las herramientas para facilitar esta tarea es la similitud semántica aplicada a las ontologías.

La similitud semántica es una medida que se calcula para conocer la relación entre dos conceptos basándose en sus significados, mide la distancia entre los conceptos y mientras menor sea la distancia del camino que los relaciona, más similares son. Para entender mejor este concepto, en [Lin, 1998] se explica que: la similitud entre A y B está relacionado con los aspectos en común que comparten, cuantos más aspectos en común compartan, son más similares. Además, la similitud máxima entre A y B se alcanza cuando A y B son idénticos. La similitud semántica tiene como meta conocer si dos conceptos en una ontología son semánticamente similares generalmente en un intervalo de  $[0,1]$ , con el 0 que significa que no son similares y 1 que son completamente similares. La finalidad de este trabajo es implementar en un lenguaje de programación algunas medidas de similitud semántica basadas en conocimiento. En las cuales se encuentran las medidas basadas en estructura y las medidas basadas en características, que han sido propuestas en la literatura para evaluar las relaciones de tipo "is-a" en una ontología de dominio de Inteligencia Artificial, y medir el grado de relación taxonómica a través de una evaluación automática.

Uno de los pasos del algoritmo propuesto para evaluar las relaciones taxonómicas es calcular la similitud semántica del subconcepto y concepto pertenecientes a una

relación taxonómica (is-a o hiperónimo-hipónimo). Se puede conocer el grado de similitud de estos conceptos en base al principio de sustitución de Liskov [Liskov, 1994], donde se plantea que “*Si S es un subtipo de T, entonces los objetos de tipo T pueden ser sustituidos por objetos de tipo S*”. Los conceptos que se evalúan son hiperónimo-hipónimo, el hiperónimo es el concepto con un significado general que incluye a otros conceptos con los que guarda una relación de significado llamados hipónimos, estos conceptos tienen un significado más específico. Un hipónimo tiene todas las características semánticas del hiperónimo y también tiene características que lo diferencian de los demás hipónimos. Entonces, según el principio de sustitución de Liskov, se puede usar el hipónimo en lugar del hiperónimo. Esto lleva a la conclusión que el hipónimo comparte características semánticas con el hiperónimo, entonces se puede conocer el grado de similitud entre ellos, aplicando medidas de similitud semántica.

A continuación, se presentan algunos trabajos relacionados con la similitud semántica basadas en conocimiento.

En [Rada, 1989] se propone una métrica basada en la teoría de la propagación de la activación de [Collins, 1975] que trata sobre la memoria semántica. Esta métrica propuesta es llamada *Distancia* y evalúa el camino más corto entre dos conceptos dentro de una base jerárquica de conocimientos.

En [Wu, 1994] se propone una medida para calcular la similitud semántica y resolver el problema de selección léxica en la traducción automática. Los autores definen que la similitud de dos conceptos  $C_1$  y  $C_2$  se conoce por la cercanía de la relación en la jerarquía.

En [Li, 2003] se plantea una medida para medir la similitud semántica en una taxonomía con relaciones tipo "is-a" y también para relaciones tipo "has-a". Esta medida se calcula obteniendo el camino más corto, la profundidad del subsumidor, (subsumidor se define como el ancestro común más específico entre dos conceptos en una ontología en [Resnik, 1999]) y la densidad semántica local, para dos conceptos a los que se quiere conocer su similitud.

En [Meadche, 2002] para comparar dos ontologías y medir la similitud entre ellas consideran diferentes niveles semióticos. Se centran principalmente en dos niveles:

el nivel léxico y el nivel conceptual. En el nivel conceptual, calculan la similitud entre dos conceptos considerando su cotopia semántica ascendente, es decir, el conjunto de todos sus super-conceptos.

En [Rodríguez, 2003] proponen un enfoque para medir la similitud de dos conceptos en diferentes ontologías utilizando la teoría de conjuntos. Los autores definen su medida de similitud propuesta basándose en la normalización del modelo de [Tversky, 1977] y las funciones de intersección y diferencia de conjuntos.

En [Sánchez, 2012] se presenta una nueva medida clasificada dentro de los enfoques basados en características que sigue el modelo propuesto en [Tversky, 1977].

Esta medida sólo se basa en la información taxonómica. Los autores consideran que un concepto se puede diferenciar semánticamente de otro al comparar el conjunto de conceptos que subsume a este concepto, es decir, el conjunto de conceptos ancestros.

En [Petrakis, 2006] proponen una nueva medida de similitud basada en características llamada *X-Similarity*, especialmente aplicada para calcular la similitud entre dos ontologías diferentes, aunque puede aplicarse a una sola ontología. Investigaron varias propuestas de medidas de similitud semántica de diferentes tipos: conteo de aristas, contenido de información, basados en características e híbridas.

Probaron estas medidas de similitud en cada una de las ontologías de WordNet y MeSH y para hacer la comparación de ambas ontologías, sólo probaron las medidas basadas en características e híbridas.

Por otro lado, en [Tovar, 2018] se ha llevado a cabo la evaluación o validación de relaciones semánticas en ontologías de dominio, por medio de enfoques basados en patrones o por análisis formal de conceptos utilizando corpora de dominio.

En esta investigación, con base en los trabajos presentados en [Rada, 1989], [Wu, 1994], [Li, 2003], [Rodríguez, 2003], [Sánchez, 2012], [Petrakis, 2006], [Harispe, 2015] y [Zhu, 2017], se evaluaron las relaciones taxonómicas de tipo “is-a” entre conceptos en una ontología de dominio de Inteligencia artificial para saber el grado de relación que existe entre estos conceptos y emitir un juicio de calidad

automáticamente mediante la implementación de medidas de similitud semánticas. La evaluación se realizó mediante la medida de exactitud.

## 2. Métodos

De acuerdo con Harispe [Harispe, 2015] las medidas de similitud entre dos conceptos dada una taxonomía se dividen en: las medidas basadas en estructura, las medidas basadas en características, las medidas basadas en contenido de información y las medidas híbridas.

En este trabajo se desarrollaron seis medidas: tres basadas en estructura y tres basadas en características. Las medidas basadas en estructura son aquellas que se basan en la distancia que hay entre dos conceptos en la taxonomía.

En [Slimani, 2013] se describen las medidas basadas en características, ellas asumen que cada concepto se describe mediante un conjunto de conceptos que indican sus propiedades o características. Estas medidas se definen en función de sus propiedades o en función de sus relaciones con otros términos similares en la estructura jerárquica. Se implementaron tres medidas basadas en características que se basan en el trabajo de [Zhu, 2017], haciendo una adaptación en el lenguaje de programación Python, usando NLTK [Bird, 2009], RDFlib y el *framework* Sematch [Zhu, 2015] para aplicarla a una ontología en particular en formato OWL.

### Medidas de similitud basadas en estructura

#### Path

En [Rada, 1989] se propone la medida llamada "Distancia" para medir la distancia que existe entre dos conceptos  $C_u$  y  $C_v$  en una taxonomía, o como también se le conoce, el camino más corto (*length*). En base a esta distancia, se puede obtener la similitud entre dos conceptos usando la ecuación 1.

$$sim_{path}(C_u, C_v) = \frac{1}{1 + length(C_u, C_v)} \quad (1)$$

Para las medidas de Wu-Palmer [Wu, 1994] y Li [Li, 2003], se deben conocer primero dos conceptos fundamentales para su implementación.

La profundidad o *depth* de un concepto es el camino más corto desde el concepto  $C_u$  al concepto raíz  $C_{raiz}$  y se define en la ecuación 2.

$$depth(C_u) = length(C_u, C_{raiz}) \quad (2)$$

En las medidas de similitud de Wu-Palmer y Li se necesita calcular el subsumidor menos común (LCS) que es un concepto en la taxonomía que se refiere al ancestro específico más común de dos conceptos  $C_u$  y  $C_v$ . Como se puede observar en la figura 1, el LCS de *conditional\_planning* y *state\_space\_search* es *subfields\_of\_artificial\_intelligence*.

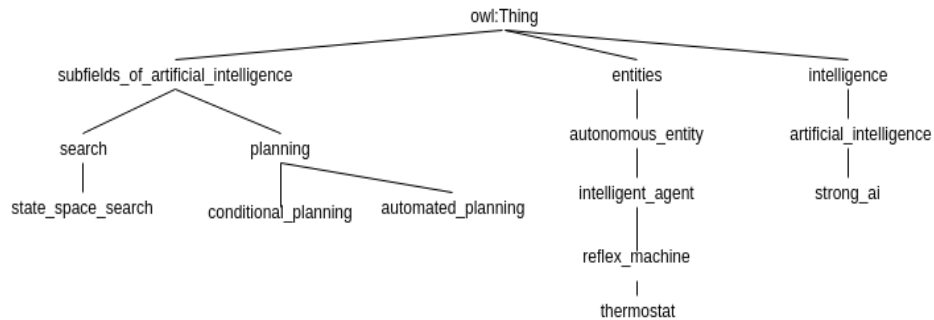


Figura 1 Fragmento de la taxonomía de IA [Zuoq, 2012].

### Wu-Palmer

En [Wu, 1994] se define la medida de Wu-Palmer, donde se obtiene la similitud de dos conceptos  $C_u$  y  $C_v$  calculando la profundidad (*depth*) de cada uno de los conceptos  $C_u$  y  $C_v$ , así como la profundidad del concepto *LCS*,  $C_{LCS}$ . Esta medida se expresa en la ecuación 3.

$$sim_{wup}(C_u, C_v) = \frac{2 * depth(C_{LCS})}{depth(C_u) + depth(C_v)} \quad (3)$$

### Li

En [Li, 2003] miden la medida de similitud combinando el concepto de camino más corto (*length*) desde  $C_u$  y  $C_v$ , y la profundidad (*depth*) del concepto subsumidor menos común ( $C_{uLCS}$ ). Esta medida se formula en la ecuación 4.



$$sim_{Li}(C_u, C_v) = e^{-\alpha length(C_u, C_v)} \frac{e^{\beta depth(C_{LCS})} - e^{-\beta depth(C_{LCS})}}{e^{\beta depth(C_{LCS})} + e^{-\beta depth(C_{LCS})}} \quad (4)$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro que contribuye a la longitud del camino (*length*) y  $\beta$  es un parámetro para la profundidad del camino (*depth*). Los valores óptimos para estos parámetros son 0.2 y 0.6 respectivamente, según el trabajo de [Li, 2003].

## Medidas de similitud basadas en características

### CMatch

Esta medida propuesta en [Meadche, 2002] a partir del índice de Jaccard, considera las características o el conjunto de ancestros de un concepto  $u$  que se define como  $A(u)$ . La ecuación 5 fue propuesta en el trabajo de [Harispe, 2015].

$$sim_{CMatch}(u, v) = \frac{|A_u \cap A_v|}{|A_u \cup A_v|} \quad (5)$$

### RE

Esta medida fue propuesta por [Rodríguez, 2012] es una normalización del modelo de [Tversky, 1977] con funciones de teoría de conjuntos como la intersección ( $\cap$ ) y la diferencia ( $\setminus$ ). La ecuación 6 es la propuesta por [Rodríguez, 2012] siguiendo el formato de [Harispe, 2015].

$$sin_{RE}(u, v) = \frac{|A_u \cap A_v|}{\gamma |A_u \setminus A_v| + (1 - \gamma) |A_v \setminus A_u| + |A_u \cap A_v|} \quad (6)$$

Donde  $\gamma$  es un parámetro para ajustar la simetría de esta medida donde  $\gamma \in [0.1]$ ,  $A(u)$  es el conjunto de ancestros del concepto  $u$  y  $A(v)$  es el conjunto de ancestros del concepto  $v$ .

### Sánchez

Propuesta en [Sánchez, 2012], en esta medida se calcula la distancia taxonómica de dos conceptos  $u$  y  $v$  dividiendo la cardinalidad del conjunto de características diferentes  $A(u)$  con  $A(v)$  y viceversa, entre la suma de las cardinalidades de los conjuntos de características taxonómicas diferentes y comunes. Esta medida mostrada en la ecuación 7 también sigue el formato de [Harispe, 2015].

$$dist_{Sánchez}(u, v) = \log_2\left(1 + \frac{|A_u \setminus A_v| + |A_v \setminus A_u|}{|A_u \setminus A_v| + |A_v \setminus A_u| + |A_u \cap A_v|}\right) \quad (7)$$

Para evitar valores infinitos en términos equivalentes al logaritmo ( $\log_2$ ) se le añade 1 a la ecuación. Además, esta ecuación tiene un rango de valores en los resultados en un intervalo de  $[0...1]$ .

### Algoritmo propuesto

Para evaluar las relaciones taxonómicas de una ontología de dominio se presenta un algoritmo que usa la medida de exactitud mostrada en la ecuación 8.

$$Exactitud = \frac{\text{Cantidad de casos correctos}}{\text{Total de casos}} \quad (8)$$

El algoritmo tiene como función que por cada dos conceptos que integran la relación taxonómica, se calculan las seis medidas de similitud semántica. Al finalizar el paso anterior, se procede a calcular un umbral por cada medida ( $umbral_{medida}$ ). Si el resultado de la medida de similitud es superior al  $umbral_{medida}$ , se considera que la relación taxonómica es verdadera, de lo contrario es falsa. Después, se aplica la medida de exactitud al total de las relaciones taxonómicas. Por otro lado, se calcula un promedio de umbrales ( $umbral_{promedio}$ ) y se realiza el mismo procedimiento que el paso anterior con el  $umbral_{medida}$ . Se vuelve a calcular la exactitud para los nuevos resultados. En el algoritmo se realiza una comparación de los resultados de las medidas de similitud contra una lista anotada por un experto en el dominio. El experto determinó si el par de conceptos que forman la relación taxonómica es verdadera o falsa, buscando los mismos en un diccionario de hiperónimo-hipónimo, además de consultar la base de datos léxico-conceptual, WordNet. Antes de los pasos del algoritmo, el framework requiere la ontología de Inteligencia Artificial en formato OWL (ai.owl). En la figura 2 se presenta una representación del algoritmo para evaluar las relaciones taxonómicas.

Ahora se presentan los pasos detallados que sigue el algoritmo:

- Preprocesamiento:
  - ✓ Entradas: Se toman como entrada tres listas: la primera es la lista de

conceptos encontrados en la ontología de IA (conceptos[]), la segunda lista contiene los subconceptos (subconceptos[]), y la tercera es la lista de validación de las relaciones por parte de un experto de dominio (experto[]). Además del total de relaciones "is-a" ( $|RT|$ ).

- ✓ De la ontología en formato OWL, se extraen los conceptos y subconceptos usando la librería de Python, owlready2.
- Cálculo de la similitud semántica.

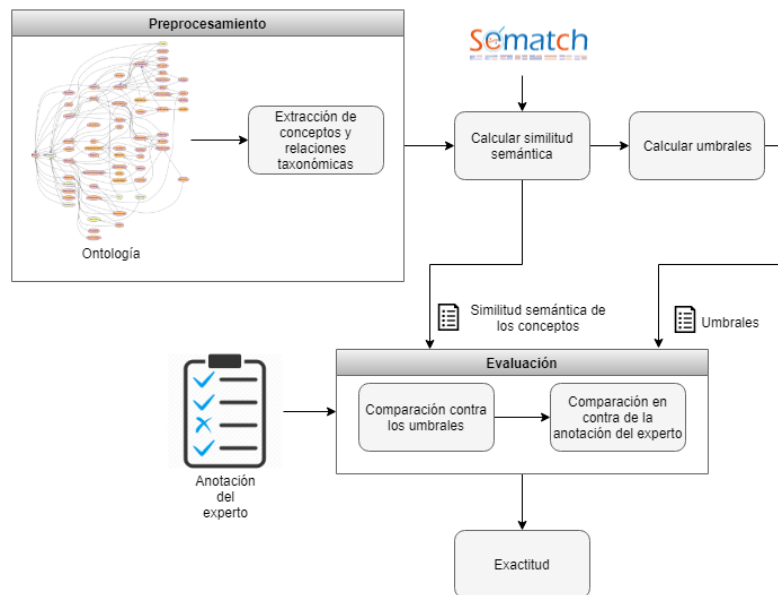


Figura 2 Representación gráfica del algoritmo.

Por cada par de conceptos que integran la relación taxonómica (concepto-subconcepto), se calcula su similitud semántica, el procedimiento se detalla a continuación:

- Iterar hasta  $|RT|$  y llamar a las funciones específicas de cada medida de similitud que se encuentran en el framework Sematch propuesto en [Zhu, 2015], y calcular la similitud entre los conceptos y subconceptos. Guardar el resultado en una lista por cada medida de similitud llamada  $res_{medida}$  (medida se refiere a cada una de las medidas de similitud).
- Cálculo de los umbrales.
- Calcular el  $umbral_{medida}$  para cada medida de similitud, sumando los

resultados de  $res_{medida}$  y dividirlo por el total de relaciones  $|RT|$ .

- Calcular el umbral $_{promedio}$ , que se obtiene de calcular el promedio de todos los umbral $_{medida}$ .
- Evaluación de las relaciones taxonómicas.
- Comparación contra umbrales. En este paso, se comparan los resultados de  $res_{medida}$  contra el umbral $_{medida}$  correspondiente, para cada una de las medidas de similitud. Este proceso se realiza de la siguiente manera: se itera hasta  $|RT|$  y se pregunta si cada resultado en  $res_{medida}$  es mayor o igual al umbral $_{medida}$  entonces, en una lista tablaVerdad $_{medida}$  se guarda el valor 1 (verdadero), de modo contrario, se guarda en la lista el valor 0 (falso).
- Además, se comparan los resultados de cada lista de  $res_{medida}$ , contra el umbral $_{promedio}$ . Se realiza de la siguiente manera: se itera hasta  $|RT|$ . Para cada resultado en las seis listas de  $res_{medida}$  se calcula el promedio de estos seis resultados, y si este promedio es mayor o igual al umbral $_{promedio}$ , entonces, se guarda en una lista tablaPromGeneral el valor 1, en caso contrario, se guarda el valor 0.
- Comparación contra la anotación del experto. Se procede a comparar los resultados en cada lista tablaVerdad $_{medida}$  contra los valores de la lista experto. Se itera hasta  $|RT|$  y se pregunta si para cada resultado en tablaVerdad $_{medida}$  es igual a 1 y para cada valor en experto es igual a 1 entonces, se guarda en una nueva lista exactitudTabla $_{medida}$  el valor 1. De otra manera, si para cada resultado en tablaVerdad $_{medida}$  es igual a 0 y para cada valor en experto es igual a 0 entonces, se guarda el valor 1. Para otros casos, se guarda el valor 0.
- Cálculo de la exactitud.
- Se calcula la exactitud de cada medida de similitud, siguiendo la ecuación 8 con los resultados de cada lista de exactitudTabla $_{medida}$ .
- Se calcula el promedio de los resultados de la tablaPromGeneral. Este resultado es el promedio general del sistema (Prom Sistema) de los resultados de las seis medidas de similitud.
- Se calcula la exactitud de los resultados de similitud de las seis medidas en

comparación con la lista anotada del experto (Prom Experto). Esto se obtiene de la misma manera que el cálculo de la exactitud para cada medida. Pero en este caso, se itera y comparan los resultados de la lista tablaPromGeneral contra los valores del experto y los resultados obtenidos se guardan en la tablaExactitud.

La salida que se obtiene de los pasos anteriores es la evaluación de las relaciones taxonómicas de las seis medidas de similitud utilizadas: Path, Wu y Palmer, Li, CMatch, RE y Sánchez.

Para una mejor comprensión del algoritmo propuesto anteriormente, se explicará con un ejemplo sencillo, para observar los conceptos que se usaron (tabla 1).

Tabla 1 Ejemplo aplicando el algoritmo.

Paso	Ejemplo												
<b>1. Preprocesamiento</b>													
Obtener la lista de conceptos-subconceptos.	Para la ontología de Inteligencia artificial, se obtiene la lista de conceptos-subconceptos, para este ejemplo se utilizará el siguiente par: Intelligence – artificial intelligence												
Lista de anotación del experto.	Para los conceptos-subconceptos anterior, el valor de la lista de anotación del experto es: Intelligence – artificial intelligence – verdadero (1)												
<b>2. Cálculo de las similitudes semánticas</b>													
Calcular la similitud semántica de los conceptos con las medidas implementadas en el framework Sematch.	Los resultados de aplicar cada medida de similitud a los conceptos anteriores son los siguientes: Intelligence – artificial intelligence <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Path</th> <th>Wup</th> <th>Li</th> <th>Cmatch</th> <th>RE</th> <th>San</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.500</td> <td>0.800</td> <td>0.683</td> <td>0.500</td> <td>0.833</td> <td>0.585</td> </tr> </tbody> </table>	Path	Wup	Li	Cmatch	RE	San	0.500	0.800	0.683	0.500	0.833	0.585
Path	Wup	Li	Cmatch	RE	San								
0.500	0.800	0.683	0.500	0.833	0.585								
<b>3. Cálculo de los umbrales</b>													
Calcular el $umbral_{medida}$ para cada medida de similitud.	El umbral es el resultado de la suma de la similitud entre el total de relaciones taxonómicas de la ontología. Umbrales por cada medida: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>Path</th> <th>Wup</th> <th>Li</th> <th>Cmatch</th> <th>RE</th> <th>San</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.500</td> <td>0.800</td> <td>0.683</td> <td>0.521</td> <td>0.833</td> <td>0.563</td> </tr> </tbody> </table>	Path	Wup	Li	Cmatch	RE	San	0.500	0.800	0.683	0.521	0.833	0.563
Path	Wup	Li	Cmatch	RE	San								
0.500	0.800	0.683	0.521	0.833	0.563								
Calcular el $umbral_{promedio}$ .	El cuál es el promedio de los umbrales. $umbral_{promedio} = 0.645$												
<b>4. Evaluación de las relaciones taxonómicas</b>													
Comparación contra todos los $umbral_{medida}$ .	Se procede a comparar los resultados de similitud semántica contra los $umbral_{medida}$ Se realiza de la siguiente manera: Si $res_{medida} \geq umbral_{medida}$ entonces $tablaVerdad_{medida} \leftarrow 1$ sino $tablaVerdad_{medida} \leftarrow 0$ Para la medida de similitud Path se calcula como: Si $0.5 \geq 0.5$ entonces $tablaVerdad_{path} \leftarrow 1$ Para las siguientes medidas, los valores de tablaVerdad son los siguientes:												

Tabla 1 Ejemplo aplicando el algoritmo (continuación).

<p>Comparación contra todos los umbral<sub>medida</sub>.</p>	<p>tablaVerdad<sub>wup</sub> ← 1, tablaVerdad<sub>li</sub> ← 1                  tablaVerdad<sub>cmatch</sub> ← 0, tablaVerdad<sub>re</sub> ← 1                  tablaVerdad<sub>san</sub> ← 1</p>
<p>Comparación contra umbral<sub>promedio</sub>.</p>	<p>Primero se calcula el promedio de los resultados de todas las medidas de similitud para el par de conceptos.                  Para Intelligence – artificial intelligence                  PromRes = 0.650                  Y se calcula de la siguiente manera:                  Si PromRes &gt;= umbral<sub>promedio</sub> entonces                  tablaPromGeneral ← 1                  sino                  tablaPromGeneral ← 0                  Entonces,                  Si 0.650 &gt;= 0.645 entonces                  tablaPromGeneral ← 1</p>
<p>Comparación contra la lista anotada del experto.</p>	<p>Los resultados de cada lista tablaVerdad<sub>medida</sub> se comparan contra los valores de la lista experto.                  Se realiza de la siguiente manera:                  Si tablaVerdad<sub>medida</sub> = 1 y experto &gt;= 1 entonces                  exactitudTabla<sub>medida</sub> ← 1                  sino si tablaVerdad<sub>medida</sub> = 0 y experto &gt;= 0 entonces                  exactitudTabla<sub>medida</sub> ← 1                  sino                  exactitudTabla<sub>medida</sub> ← 0                  Para Intelligence – artificial intelligence, el experto dice que es una relación verdadera (1), entonces.                  Para Path:                  Si (1 = 1) y (1 &gt;= 1)                  exactitudTabla<sub>path</sub> ← 1                  Los resultados de exactitudTabla para las demás medidas siguientes:                  exactitudTabla<sub>wup</sub> ← 1, exactitudTabla<sub>li</sub> ← 1                  exactitudTabla<sub>cmatch</sub> ← 0, exactitudTabla<sub>re</sub> ← 1                  exactitudTabla<sub>san</sub> ← 1</p>
<p><b>5. Cálculo de la exactitud.</b></p>	
<p>Se calcula la exactitud de cada medida de similitud</p>	<p>La exactitud para todos los conceptos de la ontología aplicando la ecuación 8, se calcula de la siguiente manera:  <math display="block">\text{Exactitud}_{\text{medida}} = \frac{\sum \text{tablaVerdad}_{\text{medida}}}{205}</math>                 Entonces, por ejemplo, la exactitud de la medida Path se calcula de la siguiente manera:  <math display="block">\text{Exactitud}_{\text{path}} = \frac{\sum \text{tablaVerdad}_{\text{path}}}{205} = 0.888</math>                 Las exactitudes de las siguientes medidas son:                  Exactitud<sub>wup</sub> = 0.854, Exactitud<sub>li</sub> = 0.849                  Exactitud<sub>cmatch</sub> = 0.976, Exactitud<sub>re</sub> = 0.893                  Exactitud<sub>san</sub> = 0.912</p>
<p>Se calcula la exactitud de los resultados de similitud de las seis medidas en comparación con la lista anotada del experto (Prom Experto).</p>	<p>Antes de calcular la exactitud, se procede a comparar los valores de la tablaPromGeneral con la lista anotada del experto, y los resultados obtenidos se guardan en la lista tablaExactitud.                  Después, se procede a calcular la exactitud (Prom Experto), de la misma manera que la exactitud anterior aplicando la ecuación 8, pero esta vez a la tablaExactitud.  <math display="block">\text{Prom Experto} = \frac{\sum \text{tablaExactitud}}{205} = 0.902</math></p>

### 3. Resultados

Para esta investigación se utilizó una ontología de Inteligencia Artificial propuesta en [Zouaq, 2012]. En la tabla 2 se muestra el total de conceptos ( $|C|$ ) y el total de relaciones taxonómicas ( $|RT|$ ) existentes en la ontología de dominio.

Tabla 2 Total de conceptos y relaciones taxonómicas de la ontología IA.

<b>Ontología</b>	<b> C </b>	<b> RT </b>
IA	233	205

En la tabla 3 se muestran los resultados experimentales de las seis medidas de similitud que se aplicaron a un subconjunto de relaciones taxonómicas de la ontología de dominio.

Tabla 3 Resultados obtenidos por cada medida de similitud semántica.

<b>Concepto<sub>1</sub></b>	<b>Concepto<sub>2</sub></b>	<b>Path</b>	<b>Wup</b>	<b>Li</b>	<b>Cmatch</b>	<b>RE</b>	<b>San</b>
Standard	RDF	0.500	0.400	0.439	0.500	0.833	0.585
Language	Natural Language	0.500	0.857	0.775	0.667	0.909	0.415
Ability	Human Cognitive Ability	0.500	0.800	0.683	0.500	0.833	0.585
Artificial Intelligence	Strong AI	0.500	0.333	0.439	0.333	0.500	0.737
Set of Inference	Representation	0.500	0.667	0.682	0.333	0.500	0.737

Con la finalidad de emitir el grado de similitud entre los pares de conceptos que integran la relación taxonómica, se procedió a calcular un umbral para cada medida de similitud, procedimiento que se detalla en el algoritmo de la sección 2. Para tener un mejor criterio se calculó un nuevo umbral, llamado Umbral Promedio, obtenido del promedio de los umbrales de cada una de las seis medidas de similitud utilizadas en esta investigación. Los umbrales obtenidos son presentados en la tabla 4.

Tabla 4 Umbral para cada medida.

<b>Path</b>	<b>Wup</b>	<b>Li</b>	<b>Cmatch</b>	<b>RE</b>	<b>San</b>	<b>Promedio</b>
0.500	0.779	0.680	0.521	0.833	0.563	0.645

En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos de la medida exactitud para cada medida de similitud semántica implementada en este artículo.

Tabla 5 Exactitud obtenida para la ontología IA por cada medida de similitud.

<b>Ontología</b>	<b>Experto</b>	<b>Path</b>	<b>Wup</b>	<b>Li</b>	<b>Cmatch</b>	<b>RE</b>	<b>San</b>
IA	0.880	0.888	0.854	0.849	0.976	0.893	0.912

En la tabla 6, se presentan los resultados obtenidos con el umbral promedio (Prom Sistema) y su exactitud obtenida (Prom Experto) que indica que las relaciones taxonómicas son un 92% similares y que los resultados con respecto al experto se encuentran muy cercanos. Podemos concluir que los resultados indican que las relaciones taxonómicas son correctas en un 92% de exactitud.

Tabla 6 Resultados obtenidos con el umbral promedio y su exactitud.

<b>Ontología</b>	<b>Prom Sistema</b>	<b>Prom Experto</b>
IA	0.927	0.902

#### **4. Discusión**

En este trabajo se implementaron seis medidas de similitud semántica, como se observa en los resultados, con las medidas basadas en características los resultados en las exactitudes son ligeramente mayores a las medidas basadas en estructura, esto se debe a que las medidas basadas en características necesitan del conjunto de ancestros de cada par de conceptos y no sólo se necesitan la profundidad y la distancia del par de conceptos como en las medidas basadas en estructura. El resultado de Prom Sistema es el resultado de comparar los resultados de todas las medidas de similitud contra el umbral<sub>promedio</sub>, donde basándonos en el resultado obtenido, un 92% de las relaciones taxonómicas son similares. El valor de Prom Experto es la exactitud de comparar los resultados obtenidos de la similitud de todas las medidas contra la opinión de un experto de dominio, en base al resultado obtenido, se tiene un 90% de exactitud en las medidas, en contra a la exactitud del experto con un 88%.



## **5. Conclusiones**

En este artículo se propone e implementa un algoritmo para la evaluación de relaciones taxonómicas de tipo “is-a” en una ontología de dominio escrito en el lenguaje de programación Python. Además, se implementaron seis medidas de similitud semántica utilizando el framework Sematch. Con los resultados experimentales obtenidos, con las medidas basadas en estructura, al menos el 84% de las relaciones taxonómicas mantienen este tipo de relación semántica en la ontología de dominio. En las medidas de similitud basadas en características, se obtiene que al menos un 89% de las relaciones taxonómicas mantienen la relación semántica. En base a los resultados experimentales, se observa una mejora en los resultados de las medidas basadas en características en comparación a las medidas basadas en estructura.

Como trabajo futuro se propone implementar otras medidas de similitud semántica basadas en contenido de información para obtener diferentes resultados y compararlos con los resultados obtenidos en este trabajo. También, se aplicarán todas las medidas de similitud aplicadas en este trabajo además de las basadas en contenido de información, a diferentes ontologías de dominio, para comprobar la eficiencia de nuestro algoritmo, con la finalidad de emitir un juicio en la evaluación de las relaciones semánticas y conceptos definidos en ontologías de dominio.

Esta investigación es apoyada por el Fondo Sectorial de Investigación para la Educación, con el proyecto CONACYT CB/257357 y por el proyecto VIEP-BUAP ID 00356, México.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Berners-Lee, T., Helder, J. & Lassila, O. The Semantic Web. Scientific American, no. 5, vol. 284, pp. 34-43, 2001.
- [2] Bird, S., Klein, E. & Loper, E. Natural Language Processing with Python. 1st edn. O'Reilly Media, Inc. 2009.
- [3] Collins, A. M. & Loftus, E. F. A spreading-activation theory of semantic processing. Psychological Review, vol. 86, no. 6, pp. 407-428, 1975.

- [4] Gruber, T. R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 43, issues 5-6, pp. 907-928, 1995.
- [5] Harispe, S., Ranwez, S., Janaqi, S. & Montmain, J. *Semantic Similarity from Natural Language and Ontology Analysis*. Morgan & Claypool Publishers. 2015.
- [6] J. Jiang, Jay & W. Conrath, David. *Semantic Similarity Based on Corpus Statistics and Lexical Taxonomy*. Proceedings of the International Conference on Research in Computational Linguistics. 1997.
- [7] Li, Y., Bandar, Z. A. & McLean, D. An Approach for Measuring Semantic Similarity Between Words Using Multiple Information Sources. *IEEE Trans. on Knowl. and Data Eng.*, pp. 871-882, 2003.
- [8] Lin, D. An Information-Theoretic Definition of Similarity. In Proceedings of the Fifteenth International Conference on Machine Learning (ICML '98), Jude W. Shavlik (Ed.). Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, pp. 296-304. 1998.
- [9] Liskov, B., & Wing, J.M. A Behavioral Notion of Subtyping. *ACM Trans. Program. Lang. Syst.*, 16, pp. 1811-1841.1994.
- [10] Meadche, A. & Staab, S. Measuring Similarity Between Ontologies. Proceedings of the 13th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management. *Ontologies and the Semantic Web*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 251-263, 2002.
- [11] Petrakis, E. G. M., Varelas, G., Hliaoutakis, A. & Raftopoulou, P. X-Similarity: Computing Semantic Similarity between Concepts from Different Ontologies. *Journal of Digital Information Management*, vol. 4, pp. 233-237, 2006.
- [12] Rada, R., Miki, H., Bicknell, E. & Blettner, M. Development and application of a metric on semantic nets. In *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 19, no. 1, pp. 17-30, 1989.
- [13] Tversky, A. Features of Similarity. *Psychological Rev*, vol. 84, pp. 327-352, 1977.

- [14] Rodriguez, M. A. & Egenhofer, M. J. Determining semantic similarity among entity classes from different ontologies. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 442-456, 2003.
- [15] Sánchez, D., Batet, M., Isern, D. & Valls, A. Ontology-based semantic similarity: A new feature-based approach. *Experts Systems with Applications*, vol. 39, no. 9, pp. 7718-7728, 2012.
- [16] Slimani, T. Description and Evaluation of Semantic Similarity Measures Approaches. *International Journal of Computer Applications*. Vol 80. pp. 25-33. 2013.
- [17] Tovar, M., Pinto, D., Montes, A., Serna, J. G. A metric for the evaluation of restricted domain ontologies. *Computación y Sistemas*, vol. 22, no. 1, pp. 147-162, 2018.
- [18] Wu, Z. & Palmer, M. Verbs semantics and lexical selection. In *Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics (ACL '94)*. Association for Computational Linguistics, Stroudsburg, PA, USA, pp. 133-138, 1994.
- [19] Zhu, G. & Iglesias, C. A. Computing Semantic Similarity of Concepts in Knowledge Graphs, in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 29., no. 1, pp. 72-85, 2017.
- [20] Zouaq, A., Gasevic, D. & Hatala, M. Linguistic patterns for information extraction in ontocmaps. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Ontology Patterns*, Blomqvist, E., Gangemi, A., Hammar, K. & Suárez-Figueroa, M. C. (Eds.), vol. 929, pp. 61-72, 2012.

# **SISTEMA PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN EL RECUBRIMIENTO DE TUBERÍAS SUBTERRÁNEAS CON BASE EN UN ROBOT MÓVIL Y BAJO LA PERSPECTIVA DEL INTERNET DE LAS COSAS**

*SYSTEM FOR THE DETECTION OF FAULTS IN THE COATING OF UNDERGROUND PIPELINES BASED ON A MOBILE ROBOT AND UNDER THE PERSPECTIVE OF THE INTERNET OF THINGS*

***Enrique Gerardo Hernández Vega***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua  
*ehernand@itchihuahua.edu.mx*

***Luis Guillermo Floriano Gavaldón***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua  
*lflorian@itchihuahua.edu.mx*

***Wendy Arlet Portillo González***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua  
*waportillo@itchihuahua.edu.mx*

***Francisco Javier Álvarez Prieto***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua  
*fjalvarezp@itchihuahua.edu.mx*

***Jesús Alonso Reyes Porras***

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua  
*jareyes@itchihuahua.edu.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presentan los avances de una nueva forma de diagnosticar el estado en el que se encuentra el recubrimiento de las tuberías subterráneas, de una manera autónoma por medio de un robot móvil con la capacidad de automatizar la medición de gradientes de voltaje que hoy en día se realiza de manera manual, con la técnica de Gradiente de Voltaje de Corriente Continua.

Dicho sistema operando bajo la perspectiva del Internet de las cosas, permite el registro y almacenamiento de dichas mediciones, enviándolas vía internet a una interfaz gráfica de usuario desarrollada en una plataforma web. Esto con la finalidad

de desarrollar una herramienta confiable que realice la medición y el registro de gradientes de potencial a lo largo de toda la tubería, reduciendo con esto la carga de trabajo del operador y evitando posibles errores humanos.

**Palabras Claves:** DCVG, internet de las cosas, robot móvil, tuberías subterráneas.

## **Abstract**

*In this work the advances of a new form of diagnosis of the state in which the coating of the underground pipes is found are presented, in an autonomous way by means of a mobile robot with the capacity to automate the measurement of gradients of voltage that today is done manually with the Continuous Current Voltage Gradient. This system, operating in the perspective of the internet of things, allows the recording and storage of measurements, sending them via the Internet to a graphical user interface developed on a web platform. This in order to develop a reliable tool that performs the measurement and recording of potential gradients along the entire pipeline, thereby reducing the workload of the operator and avoiding possible human errors.*

**Keywords:** DCVG, internet of things, mobile robot, underground pipes.

## **1. Introducción**

Para prevenir los daños causados por corrosión externa, las tuberías subterráneas son protegidas con una combinación de revestimientos dieléctricos y sistemas de protección catódica. Aunque los revestimientos generalmente proporcionan una excelente protección, la mayoría de ellos se deterioran con el tiempo debido a la absorción de agua, presiones de la tierra, daños provocados por las raíces de los árboles, ataques bacteriológicos y otras causas. Estos daños permiten que la corrosión ocurra en los lugares en donde se producen contactos entre el medio corrosivo, la tierra en este caso, y las superficies del acero expuestas por los defectos del revestimiento [PCS, 2018].

Por esta razón, es importante tener conocimientos generales de los elementos fundamentales en la corrosión como son el suelo y la tubería, de los conceptos básicos sobre los tipos, formas y comportamiento de este fenómeno y las

alternativas de prevención que permitan minimizar las pérdidas económicas que a través del tiempo afectan a la industria y a la sociedad. Por lo tanto, es necesario conocer las técnicas para evaluar y diagnosticar el estado en el que se encuentra el recubrimiento de las tuberías.

Una manera de detectar si el recubrimiento de una tubería presenta daños es mediante la técnica de inspección DCVG [Nakamura, 2006]. Los defectos se localizan examinando los gradientes de potencial en la tierra que cubre las tuberías para determinar la dirección del flujo de las corrientes de protección catódica [Protan, 2007]. El proceso de inspección DCVG se conforma de 6 etapas, las cuales se realizan de forma manual.

La primera etapa consiste en el estudio preliminar de la tubería, en la segunda etapa se procede a señalar la tubería con estacas ubicadas cada 30 metros de distancia. En la tercera etapa se configuran los ciclos de interrupción de los temporizadores los cuales tendrán una relación determinada de encendido/apagado para evitar la despolarización significativa de la tubería.

En la cuarta etapa se inspecciona la tubería utilizando el medidor de gradiente de potencial. La magnitud del gradiente de potencial en el electrólito en diversas direcciones ayuda a determinar el estado de conservación del revestimiento [Ojeda, 2016]. El empleo de dicho instrumento permite obtener información del tamaño, forma y severidad de cada defecto, mientras más grande es el defecto mayor es el flujo de corriente [Montenegro, 2001]. Sin embargo, los resultados de medición dependen significativamente de las propiedades del medio ambiente (resistividad del subsuelo) y pueden variar con las condiciones climáticas por lo que las mediciones se pueden subvalorar o sobrevalorar [Chacón, 2014]. En la quinta etapa se coloca una estaca sobre el punto de ubicación de cada defecto para facilitar la identificación al momento de realizar la reparación. Al finalizar la jornada de trabajo de campo, el operador exporta los datos al software destinado al análisis de la información.

Finalmente, mediante el empleo del software (CIPS & DCVG) se procede a analizar la información revelada y determinar el estado de conservación del revestimiento. A través de una serie de gráficos se determinan cuáles son las zonas más

comprometidas y cuáles son los defectos que deben ser reparados en lo inmediato y/o a mediano plazo [Velázquez, 2010]. En la figura 1 se muestra un operador con dos electrodos de referencia y un voltímetro llevando a cabo el proceso de detección de fallas, utilizando la técnica DCVG.



Figura 1 Inspección DCVG realizada por personal capacitado.

En la actualidad la robótica móvil se ha desarrollado para un sinnúmero de soluciones particulares [Chávez, 2012]. Los robots móviles se caracterizan por su capacidad de desplazarse de forma autónoma en un entorno desconocido o conocido sólo parcialmente. Sus aplicaciones cubren una gran variedad de campos, entre los cuales se incluyen trabajos subterráneos, tareas submarinas, misiones espaciales y exploración planetaria, vigilancia e intervención de seguridad, aplicaciones militares, y otros más. En todas estas aplicaciones la justificación más importante para la aplicación de la robótica es la dificultad o imposibilidad de intervención humana [González 2015]. Dichas aplicaciones acompañadas del uso de Internet para permitir que las máquinas y los objetos inteligentes se comuniquen y coordinen entre ellos permite el desarrollo de nuevas aplicaciones y mejora de las aplicaciones ya existentes [Bonilla 2016].

La IEEE tiene dos definiciones del Internet de las cosas (IoT), las cuales están en función del entorno en que se maneje este concepto. Para un entorno pequeño, la IEEE hace la siguiente definición: El IoT es una red que conecta al Internet “cosas” que son identificables de manera única. Estas “cosas” tienen capacidades de manejo de transductores (sensores/actuadores) y potencial de programación.

Basados en la identificación única y la capacidad de sensar, la información relativa a la “cosa” puede ser obtenida y el estado de la “cosa” puede ser visto, analizado o cambiado por cualquiera, dondequiera y en cualesquiera tiempos [Minerva, Biru, Rotondi, 2015]. La segunda definición de la IEEE es para un entorno grande y considera una mayor cantidad de elementos en la caracterización tanto de las “cosas” como de la red, así como el aspecto de seguridad en el manejo de la información relacionada con las “cosas”. La definición relacionada a un entorno pequeño es la que se maneja en este trabajo.

En este artículo se presenta un avance del sistema para automatizar el proceso de detección de fallas en los recubrimientos de las tuberías subterráneas, mediante la elaboración de un robot móvil capaz de llevar a cabo las mediciones de gradientes de voltaje, de manera semejante a como se hace en la técnica DCVG. Dicho sistema opera bajo la perspectiva del internet de las cosas, lo cual permite tener acceso a la información recabada por el robot y el control remoto del mismo vía internet. Almacenando los datos en una interfaz gráfica de usuario desarrollada en una plataforma web, para el análisis de la información y toma de decisiones respecto a las acciones de mantenimiento de la tubería. El robot móvil actualmente es capaz de realizar la lectura de los gradientes de potencial, sin embargo, presenta problemas para realizar la inspección de manera autónoma debido a que no cuenta con un sistema para localizar la tubería y no es capaz de desviar su trayectoria y posteriormente regresar para seguir con su camino, lo cual no permite la evasión de obstáculos, solo la detección de estos. Por tal motivo necesita la intervención humana para su colocación al inicio de la tubería y en caso de que sea necesario esquivar un obstáculo, lo cual se puede realizar manualmente o vía internet.

## **2. Métodos**

Para aplicar la técnica de inspección no invasiva DCVG, es necesario que la tubería cuente con un sistema de protección catódica. Dicho sistema debe contar con los elementos que se muestran en la figura 2.

En la realización de las pruebas, se utilizó como lecho anódico una varilla de acero de una longitud de 1 metro, la cual fue colocada a una profundidad de 30



centímetros, en un lugar ubicado a una distancia de 2 metros de donde está enterrada la tubería. Dicha varilla se conectó a la terminal positiva de una fuente de alimentación de 12 VDC a 2.0 Ah, la terminal negativa de la batería se conectó a un interruptor asíncrono el cual fue implementado con un microcontrolador PIC18F4550 y un módulo de un relevador, cuya función es permitir el flujo de corriente a través de la tubería por un lapso de 0.8 segundos cada 1.2 segundos.

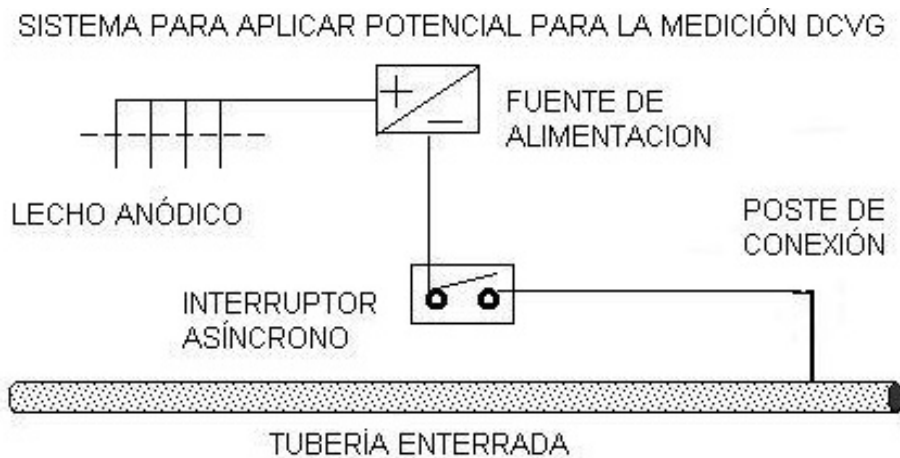


Figura 2 Sistema de protección catódica para una tubería enterrada.

En la figura 3 se muestra el diagrama a bloques del interruptor asíncrono, mientras que el diagrama de flujo de la tarea que es llevada a cabo por el microcontrolador se muestra en la figura 4. Se utilizó la interrupción del timer 0, la cual se configuró para que se accionara cada 0.2 segundos y mediante el uso de un contador se logró obtener los tiempos de encendido/apagado que se requieren para implementar el sistema de protección catódica.

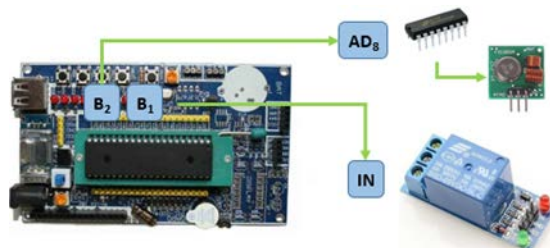


Figura 3 Diagrama a bloques del interruptor asíncrono.

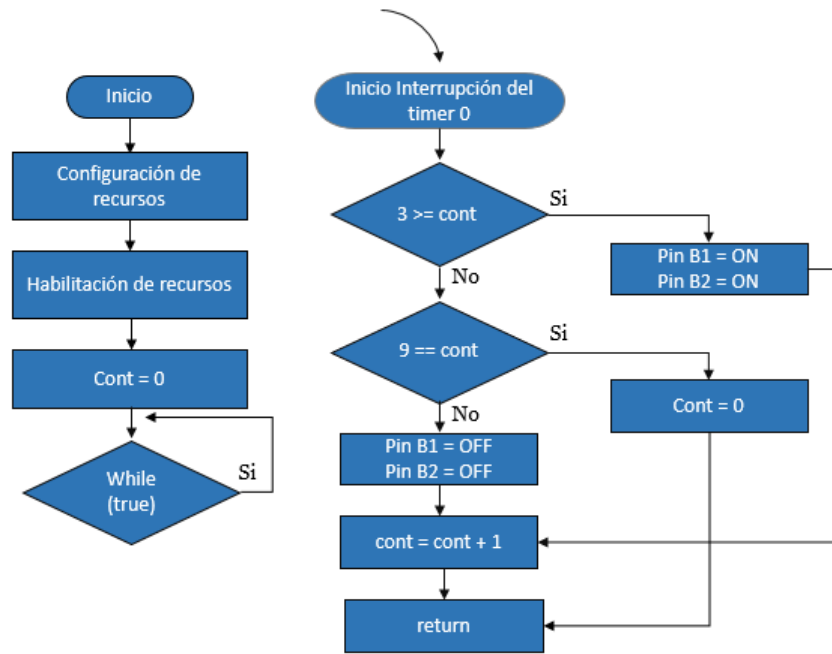


Figura 4 Diagrama de flujo de la tarea principal del PIC18F4550.

Durante los 0.8 segundos que circula corriente a través de la tubería, se presentaran líneas de isotopotencial alrededor de cada una de las fallas existentes en el recubrimiento de la tubería. La correcta medición de dichos gradientes de potencial permite la detección de las fallas. Debido a la presencia de alguna interferencia eléctrica en el suelo es necesaria la sincronización de las mediciones con el periodo de tiempo en el cual se presentan las líneas de isotopotencial, por lo cual fue necesario incluir en el sistema un dispositivo que permitiera al robot móvil conocer el momento en el cual debía realizar las mediciones. Esto se logró mediante la implementación de módulos de comunicación de radiofrecuencia a 433 MHz, ubicando el módulo emisor en el interruptor asíncrono y el módulo receptor en el robot móvil, como se muestra en la figura 5.

Para la medición de los gradientes de potencial se diseñaron y elaboraron dos electrodos de referencia, figura 6, los cuales mediante un proceso electroquímico permiten medir los gradientes de potencial presentes en el suelo. Se utilizó un tubo de PVC de ½" de 15 cm de largo al cual se le acopló una tapadera del mismo material con un orificio en el centro por donde pasa un alambre de cobre de 15 cm de largo con diámetro de 2.05 mm el cual está inmerso en sulfato de cobre.

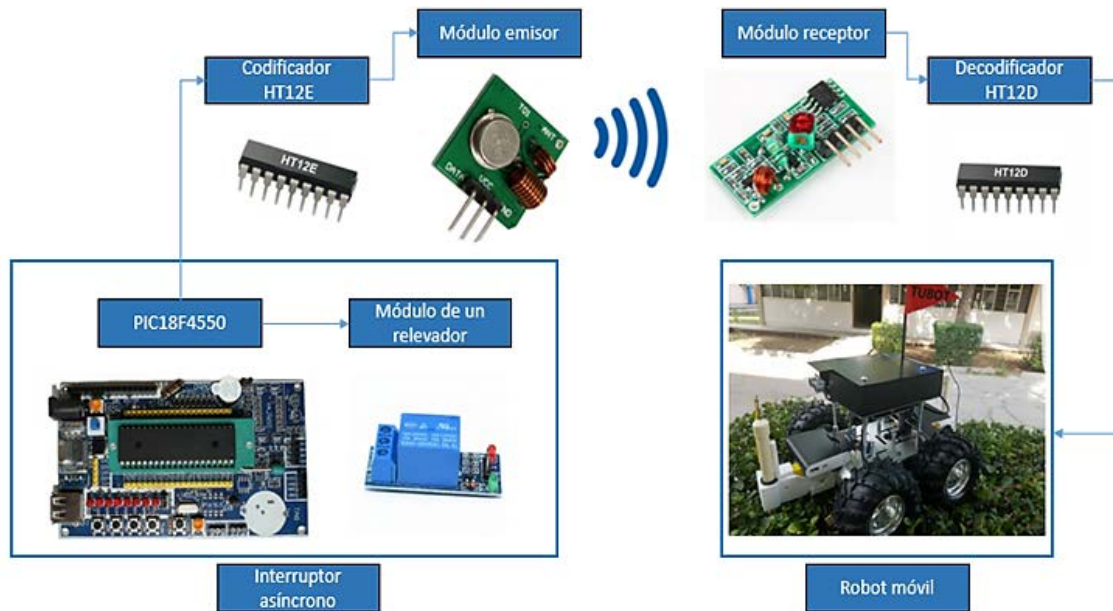


Figura 5 Diagrama a bloques del sistema de sincronización.

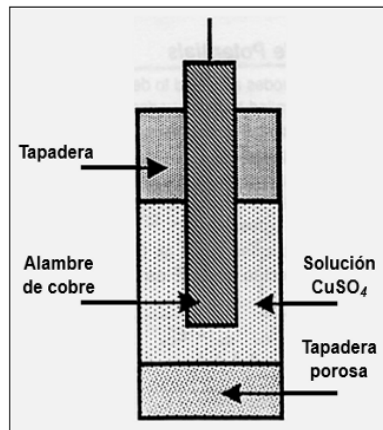


Figura 6 Electrodo de referencia.

En el otro extremo del tubo se colocó una tapadera con forma de punta la cual fue elaborada con madera para permitir que la solución trasminara y se mantuviera húmeda. Finalmente, a estos electrodos se les acopló una cremallera para que pudieran ser manipulados fácilmente por el robot móvil.

Para el posicionamiento de los electrodos se diseñó y elaboró un mecanismo mediante 3D SolidWorks, el cual se muestra en la figura 7. El mecanismo consta de una base para soportar un electrodo y un motor de corriente continua a 5 VDC al cual se le acopló un piñón para recorrer la cremallera del electrodo, figura 8.

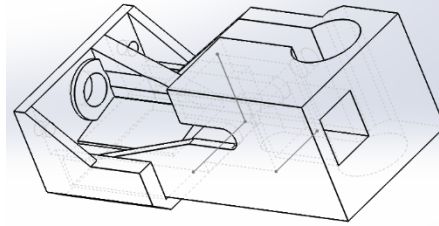


Figura 7 Modelado del mecanismo para el posicionamiento de los electrodos.



Figura 8 Sistema para el posicionamiento de los electrodos.

Para controlar la distancia que se desplazan los electrodos, se utilizó un disco con 20 perforaciones y un opto-interruptor HR0062 conectado a uno de los pines digitales de un Arduino nano, lo cual permite estimar la posición de los electrodos. Debido a que la magnitud de los gradientes de potencial presentes en el suelo se encontraba en el orden de los milivolts y era una señal que cambiaba de polaridad se realizó un circuito para el acondicionamiento de dicha señal, el cual amplificaba diez veces la señal proveniente de los electrodos y posteriormente cambiaba su nivel de referencia a 2.5 volts lo que permitía poder procesar valores positivos y negativos de la señal con un convertidor analógico-digital convencional.

Tomando en cuenta que los valores leídos por encima de 2.5 volts corresponderían a valores negativos y los valores leídos por debajo de los 2.5 volts corresponderían a valores positivos. Debido a que dicho acondicionador fue implementado con amplificadores operacionales bipolares TL084 se realizó una fuente bipolar de +5 volts y -5 volts a partir de la fuente de alimentación del robot móvil la cual era una batería de 12 VDC a 1.3 Ah. El circuito eléctrico que permite el acondicionamiento de la señal se muestra en la figura 9.

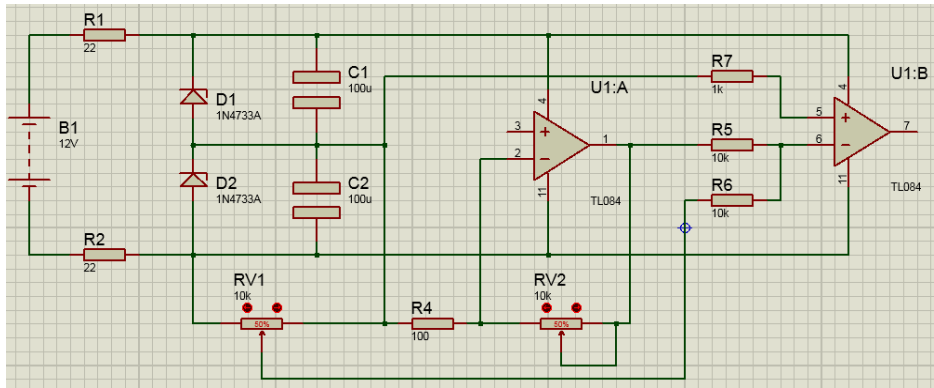


Figura 9 Diagrama del circuito para el acondicionamiento de los gradientes de potencial.

Una vez completado el sistema de posicionamiento de los electrodos se integraron 3 módulos Puente H L293 para controlar el giro y velocidad de los motores los cuales eran los encargados de mover los electrodos y del desplazamiento del robot móvil. Adicionalmente, se colocó un módulo sensor ultrasónico SRF04 para la detección de obstáculos presentes en el camino del robot, evitando con esto colisiones del mismo. El diagrama a bloques se muestra en la figura 10.

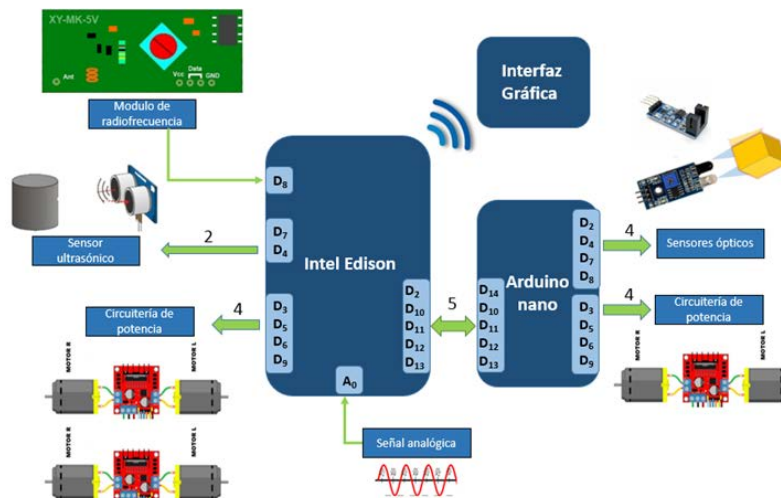


Figura 10 Diagrama a bloques de los componentes del robot móvil

Se realizó una arquitectura de software para el control de cada uno de los recursos utilizados, implementándola en una tarjeta de desarrollo Intel Edison y un Arduino nano, esto debido a que en una sola plataforma no era posible la manipulación de todos los sensores y actuadores utilizados.

En la figura 11 se muestra una representación gráfica de las funciones realizadas por el Arduino nano, el cual recibía comandos enviados por la Intel Edison a través del protocolo de comunicación SPI, lo que posteriormente generaba una interrupción en éste, figura 12, para poder llevar a cabo la tarea solicitada. Una vez que esta era completada se le indicaba a la Intel Edison por medio del pin 14. Debido a la manera en que estaba distribuido el control de sensores y actuadores en las dos tarjetas utilizadas, algunas tareas necesitaban más información que otras.

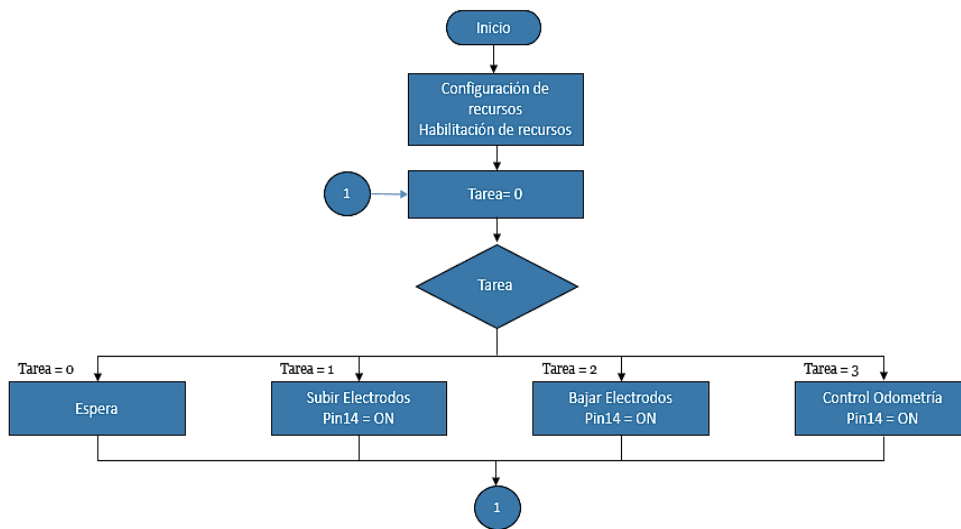


Figura 11 Diagrama de flujo de la tarea principal del Arduino nano.

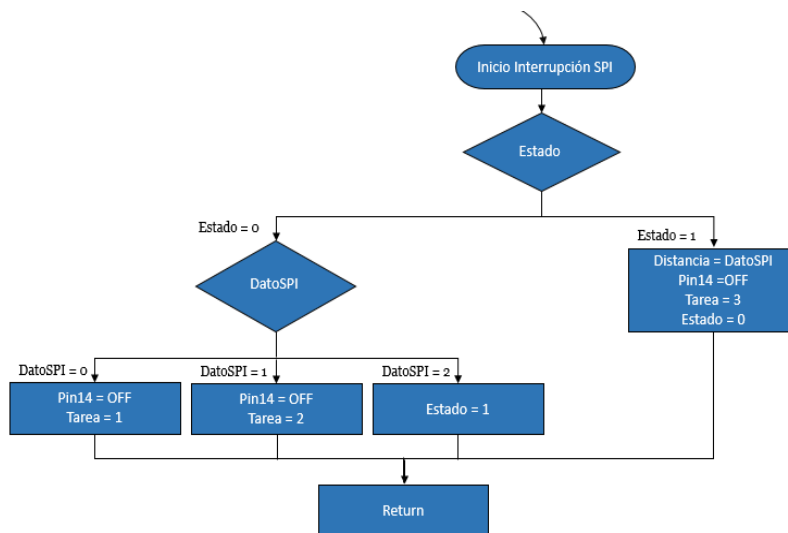


Figura 12 Subrutina de servicio a la interrupción SPI del Arduino nano.

Para el posicionamiento de los electrodos bastaba con enviar el comando que le correspondía a cada tarea, dependiendo si lo que se quería era subir o bajar los electrodos, sin embargo, para controlar la distancia que el robot móvil se debía desplazar, debido a que los motores eran controlados por la Intel Edison y los sensores por el Arduino nano, no era suficiente con enviar el comando de la tarea, también era necesario enviar la distancia que se pretendía recorrer. De esta forma se lograba el correcto desplazamiento del robot móvil.

Por parte de la Intel Edison el diagrama de flujo de las tareas que ésta realiza se muestra en la figura 13, sin embargo, para una mejor comprensión es necesario conocer la interfaz gráfica de usuario que se elaboró para este proyecto, figura 14, a través de la plataforma de Ubidots [Ubidots, 2018], ya que gran parte de las tareas realizadas dependen del intercambio de información con ésta.

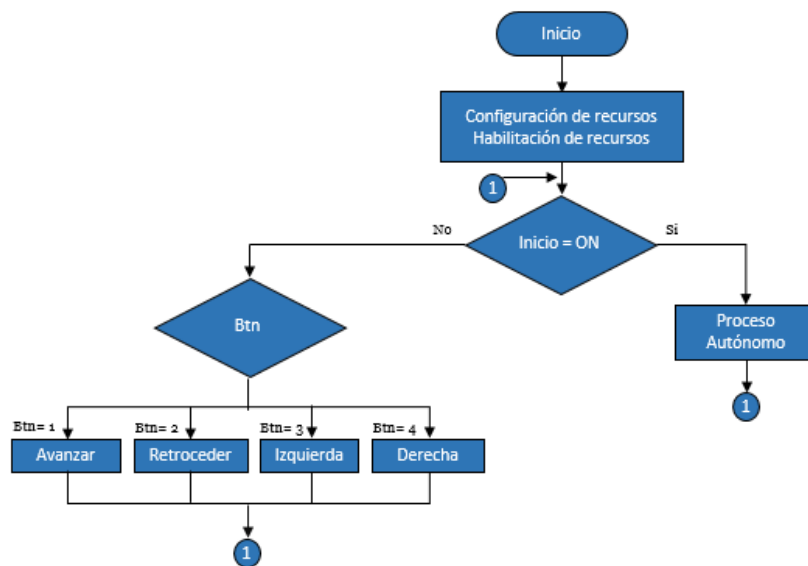


Figura 13 Diagrama de flujo de la tarea principal de la Intel Edison

En el diagrama antes mencionado es posible observar las dos distintas maneras de operar el robot móvil, el cual dependiendo del estado en el que se encuentre el botón de inicio, entrara a un modo automático o a un modo manual. Dentro del modo manual el usuario podrá controlar el robot móvil para guiarlo por medio de los cuatro botones restantes, presionando el botón de la tarea que se desea realizar y volviendo a presionar el mismo para la cancelación de esta.

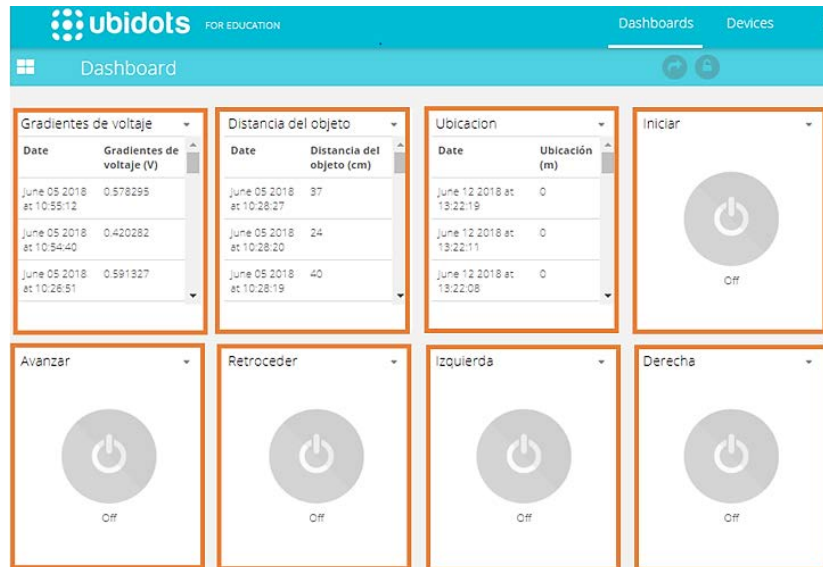


Figura 14 Interfaz gráfica de usuario.

En el modo automático, el robot móvil realizará una rutina que consta de 8 etapas, figura 15, en el caso de que no existan obstáculos presentes en el camino del robot móvil, de lo contrario se reduce a 7 etapas para evitar colisiones. En este modo el objetivo es la detección de fallas presentes en el recubrimiento de la tubería que se esté examinando. Para lograr esto es necesario tener en cuenta la manera en que se presentan los gradientes de potencial en el suelo, considerando que la magnitud del gradiente incrementará conforme el robot se aproxime a la falla y disminuirá al pasar esta, de tal manera que el robot deberá avanzar y retroceder hasta que la magnitud del gradiente de voltaje sea cero, lo cual indica que la falla ha sido detectada y se encuentra justamente en el centro del robot.

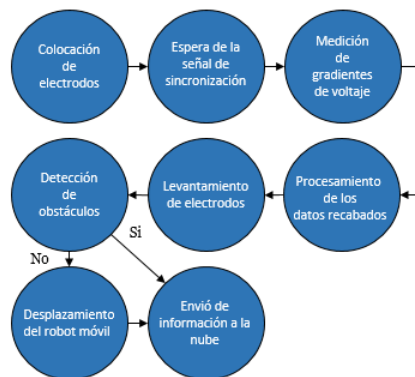


Figura 15 Etapas del proceso autónomo.



Durante la última etapa del proceso autónomo, el robot móvil cuenta con información recabada tanto de la magnitud de los gradientes de voltaje, distancia de objetos presentes en el camino y la distancia que ha recorrido, dicha información será enviada vía WiFi a la interfaz gráfica utilizando el protocolo MQTT. Una vez hecho esto la información estará disponible en la interfaz de usuario para poder ser consultada en cualquier momento.

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos en esta primera etapa del desarrollo del sistema son los siguientes:

- **Arquitectura IoT.** Implementación de una arquitectura IoT, de cuatro elementos: robot móvil, MQTT broker, interfaz gráfica y usuarios, como se muestra en la figura 16.

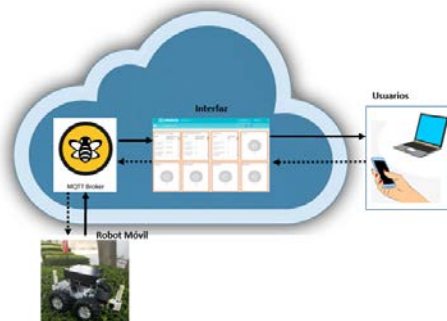
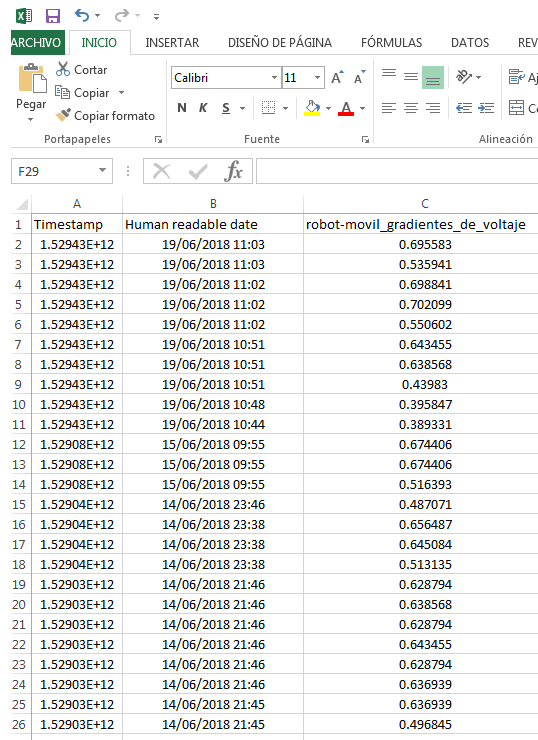


Figura 16 Arquitectura IoT basada en MQTT.

- **Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario.** La interfaz se desarrolló mediante la plataforma web Ubidots y es la encargada de realizar las siguientes funciones:
  - ✓ Comunicarse con el broker MQTT y presentar los datos de interés bajo el protocolo http, lo que garantiza su acceso desde cualquier navegador web.
  - ✓ Facilitar al usuario la manipulación del robot.
  - ✓ Permitir la escalabilidad y la adición de servicios y funciones de forma simple.

Dicha interfaz no requiere tener un sistema con gran capacidad de concurrencia de usuarios en el sitio web, puesto que el propósito para el que fue diseñada no involucra numerosos usuarios. Sin embargo, el número de usuarios que acceden a ella no es una limitante, como si lo es la cantidad de datos por minuto que puede enviar cada dispositivo el cual no puede superar los 60 datos por minuto.

- **Almacenamiento de datos de interés.** En la interfaz gráfica existen tres tópicos de interés en los cuales el robot móvil publica información de utilidad que posteriormente puede ser utilizada de la misma forma como se hace cuando es adquirida manualmente. Dicha información también presenta una limitante, ya que solo permanecerá almacenada en los servidores de la plataforma web utilizada durante un periodo de tres meses. Durante el transcurso de este periodo podrá ser descargada fácilmente generando un archivo de Excel como se muestra en la figura 17.



	A	B	C
1	Timestamp	Human readable date	robot-movil_gradientes_de_voltaje
2	1.52943E+12	19/06/2018 11:03	0.695583
3	1.52943E+12	19/06/2018 11:03	0.535941
4	1.52943E+12	19/06/2018 11:02	0.698841
5	1.52943E+12	19/06/2018 11:02	0.702099
6	1.52943E+12	19/06/2018 11:02	0.550602
7	1.52943E+12	19/06/2018 10:51	0.643455
8	1.52943E+12	19/06/2018 10:51	0.638568
9	1.52943E+12	19/06/2018 10:51	0.43983
10	1.52943E+12	19/06/2018 10:48	0.395847
11	1.52943E+12	19/06/2018 10:44	0.389331
12	1.52908E+12	15/06/2018 09:55	0.674406
13	1.52908E+12	15/06/2018 09:55	0.674406
14	1.52908E+12	15/06/2018 09:55	0.516393
15	1.52904E+12	14/06/2018 23:46	0.487071
16	1.52904E+12	14/06/2018 23:38	0.656487
17	1.52904E+12	14/06/2018 23:38	0.645084
18	1.52904E+12	14/06/2018 23:38	0.513135
19	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.628794
20	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.638568
21	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.628794
22	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.643455
23	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.628794
24	1.52903E+12	14/06/2018 21:46	0.636939
25	1.52903E+12	14/06/2018 21:45	0.636939
26	1.52903E+12	14/06/2018 21:45	0.496845

Figura 17 Archivo generado desde la interfaz gráfica sobre los gradientes de voltaje.

- Validación de los electrodos.** Utilizando una estructura metálica que se encuentra enterrada en uno de los jardines del Instituto Tecnológico de Chihuahua, la cual está destinada para este propósito y se cuenta con un registro de las fallas intencionales en el recubrimiento que ésta presenta, se verificó de manera manual el funcionamiento de los electrodos, logrando detectar la presencia de gradientes de potencial en el suelo, implementando el sistema de protección catódica y haciendo uso de los electrodos de referencia elaborados, los cuales se conectaron a un multímetro analógico con aguja al centro como se realiza en la técnica de inspección DCVG. En la figura 18 se muestra una representación gráfica de la tubería enterrada para facilitar la comprensión de los datos que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Registro de las fallas presentes en el recubrimiento de la estructura metálica

	<b>Distancia del inicio al centro de la falla</b>	<b>Posición</b>	<b>Forma de falla</b>	<b>Ancho de falla</b>	<b>Largo de falla</b>	<b>Profundidad</b>
1	116 cm	Lado derecho	Rectangular	3 cm	4 cm	41 cm
2	275 cm	Fondo	Rectangular	3 cm	3.5 cm	50 cm
3	452 cm	Tope	Rectangular	2.5 cm	3.6 cm	53 cm
4	502 cm	Tope	Rectangular	2 cm	3.5 cm	53 cm
5	547.5cm	Lado izquierdo	Rectangular	2 cm	3.5 cm	53 cm
6	671 cm	Lado derecho	Rectangular	2.5 cm	3.5 cm	54 cm
7	752 cm	Lado derecho	Rectangular	2.52 cm	3.5 cm	54 cm
8	882 cm	Tope	Rectangular	3 cm	3.5 cm	54 cm
9	997 cm	Lado derecho	Rectangular	1.5 cm	3 cm	54 cm
10	1115 cm	Tope	Rectangular	1.5 cm	3 cm	55 cm
11	1195 cm	Tope	Rectangular	2 cm	3.5 cm	56 cm
12	1254.7 cm	Lado derecho	Rectangular	2 cm	3.5 cm	56 cm
13	1480.7 cm	Lado izquierdo	Rectangular	3 cm	3.5 cm	64 cm
14	1706.7 cm	Lado izquierdo	Cuadrada	2.5 cm	2.5 cm	3.7 cm

Con la realización del procedimiento de manera manual, se corroboran los fundamentos teóricos en los que se sustenta este proyecto y se detecta una posible falla, ya que de no obtenerse el comportamiento esperado en la magnitud de los gradientes de voltaje es un indicativo de que hay que reemplazar la tapadera de madera.

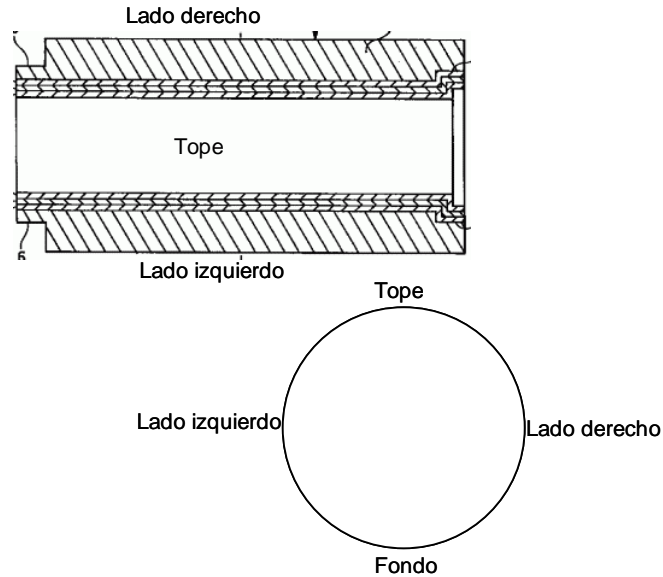


Figura 18 Representación gráfica de la estructura metálica enterrada.

- **Elaboración del prototipo.** La principal aportación de este trabajo es realizar una herramienta de apoyo al personal encargado de la inspección de tuberías subterráneas que utilice como base la técnica DCVG. Contribuyendo con etapas del proceso que resultan más desgastantes para los trabajadores, como lo es la medición y almacenamiento de gradientes de voltaje ayudando con esto a la detección de fallas en el recubrimiento de una tubería subterránea. Haciendo uso de un robot móvil, figura 19, al cual se le han acoplado los elementos necesarios para realizar el proceso de manera autónoma, lo cual de momento no se ha logrado cumplir en su totalidad.



Figura 19 Prototipo terminado.

## **4. Discusión**

En el presente trabajo se presenta un avance para lograr detectar las fallas en el recubrimiento de una tubería subterránea mediante la elaboración de un robot móvil. Sin embargo, para poder cumplir con el objetivo es necesario mejorar el sistema de navegación del robot, de tal manera que se garantice que el desplazamiento del mismo sea sobre la superficie que cubre la tubería para que la información proveniente del robot sea válida y permita realizar un diagnóstico del estado del recubrimiento de dicha tubería. Dicho sistema de igual manera debe ayudar a la implementación de maniobras para que el robot pueda esquivar obstáculos y volver a la trayectoria, para registrar la magnitud de los gradientes de potencial.

En lo que respecta a los electrodos elaborados, se pretende reemplazar la superficie porosa implementada con madera por otro material poroso que no le afecte tanto la solución de sulfato de cobre para alargar la vida útil del mismo.

En cuanto a las limitaciones del envío de información y el almacenamiento de la misma se pueden corregir cambiando la versión educativa que actualmente se utiliza, por una versión de paga utilizando la misma plataforma web.

Los resultados presentados corresponden a la primera etapa del desarrollo del sistema. En la segunda etapa concluiremos con el desarrollo del sistema realizando las pruebas de campo correspondientes y se buscará lograr la automatización de las 6 etapas del proceso de inspección DCVG.

## **5. Conclusiones**

Este sistema representa un avance en el campo de la inspección de fallas en el recubrimiento de las tuberías, con base en una de las técnicas más precisas que hoy en día se realizan de manera manual, las cuales son susceptibles a proporcionar diagnósticos erróneos producidos por errores humanos.

El uso de una aplicación de robótica móvil acompañada de la perspectiva del internet de las cosas, permite el registro de las mediciones y el almacenamiento de las mismas, enviándolas vía internet a la nube, reduciendo la carga de trabajo humano y facilitando la detección de fallas en la tubería, agilizando el proceso de inspección en tuberías subterráneas.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bonilla, I., IoT, el internet de las cosas y la innovación de sus aplicaciones, 2016.
- [2] Chacón, E., Análisis y reporte de los datos de la inspección electromagnética del estado del recubrimiento de ductos, 2014.
- [3] Chávez, M. A., Prototipo de robot móvil teleoperado, 2012.
- [4] D. V. G. T. a. S. Ltd, DC Voltage Gradient Technology and Supply, 2018. [Online]. Available: <http://dcvg.co.uk/about/> [Accessed: 04-Aug-2018].
- [5] González, J., Estimación de la posición de un robot móvil, 2015.
- [6] Minerva, R., Biru, A., Rotondi, D., Towards a definition of the Internet of Things (IoT). IEEE Internet Initiative, 2015.
- [7] Montenegro, W., Desarrollo de una metodología de inspección basada en riego (IBR) acoplada a un plan de inspección de tuberías de línea, 2001.
- [8] Nakamura, E., Desarrollo de la teoría, sistema de medición y procesamiento para la inspección electromagnética de ductos, 2006.
- [9] Ojeda, V. A., Avances en la medida de la protección catódica de estructuras metálicas enterradas mediante métodos de desconexión cíclica, 2016.
- [10] Protan S.A., Auditoria de Sistemas de Protección Catódica y Estado de Conservación de Revestimientos Anticorrosivos en Gasoductos y Oleoductos (Inspecciones CIPS – DCVG), Rosario, 2007.
- [11] PCS, Pipeline Corrosion Services, 2018: <http://www.pipelinecs.com.ar/servicios/estudio-de-ductos.html>.
- [12] Ubidots, Ubidots, 2018: <https://ubidots.com/>.
- [13] Velázquez, J. C. , Modelacion determinista y estocastica de la corrosion por picaduras en ductos enterrados, 2010.

# **EVALUACIÓN DE FIREWALLS BASADOS EN SOFTWARE LIBRE**

## *FIREWALL EVALUATION BASED ON OPEN SOURCE SOFTWARE*

### ***Adalberto Iriarte Solís***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*adalberto.iriarte@uan.edu.mx*

### ***Pablo Velarde Alvarado***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*pvelarde@uan.edu.mx*

### ***Arturo Aguirre Villaseñor***

Universidad Autónoma de Nayarit  
*arturo.aguirre@uan.edu.mx*

### ***Luis Javier Mena Camaré***

Universidad Politécnica de Sinaloa  
*lmena@upsin.edu.mx*

### ***Rafael Martínez Peláez***

Universidad de la Salle Bajío  
*rmartinezp@delasalle.edu.mx*

### ***Alberto Manuel Ochoa Brust***

Universidad de Colima  
*aochoa@ucol.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se propone la evaluación de firewalls basado en software libre GNU/LINUX con las características que les permitan integrarse a una cama de pruebas en la cual se estudiaron, evaluaron y analizaron diversos entornos de red y escenarios de ataque. Los firewalls de software libre son una buena alternativa cuando se trata de brindar seguridad en una red, en este trabajo fueron evaluados cuatro distribuciones Linux que han sido especialmente diseñadas para brindar este servicio. Las herramientas de software libre empleadas demostraron ser las adecuadas para las pruebas realizadas a los diferentes firewalls, de este modo se logró obtener resultados que muestran la factibilidad de ClearOS para ser implementado en la cama de pruebas. También se probó su efectividad al mostrar

una buena respuesta en la defensa de los ataques, con y sin la inyección del tráfico de fondo generado por la herramienta iperf.

**Palabras Claves:** Cama de pruebas, firewall, linux, software libre.

## **Abstract**

*In this work we propose the evaluation of firewalls based on free software GNU / LINUX with the characteristics that allow them to be integrated into a test bed in which various network environments and attack scenarios were studied, evaluated and analyzed. Free software firewalls are a good alternative when it comes to providing security in a network, in this work were evaluated four Linux distributions that have been specially designed to provide this service. The free software tools used, proved to be adequate for the tests carried out on the different firewalls, in this way it was possible to obtain results that show the feasibility of ClearOS to be implemented in the test bed. Its effectiveness was also proven by showing a good response in the defense of attacks, with and without the injection of background traffic generated by the iperf tool.*

**Keywords:** Firewall, linux, open software, testbed.

## **1. Introducción**

Con la explosión del Internet, la proliferación de aplicaciones de software y el ingenio de los hackers, la seguridad se ha convertido en un problema complejo que requiere de una solución de seguridad bien pensada para tratar con él. La solución de seguridad debe ser capaz de hacer frente a las amenazas de seguridad de estos nuevos escenarios, así como ser lo suficientemente flexible para adaptarse a los cambios tecnológicos, [Richard, 2004].

Para proporcionar un mayor grado de protección a los recursos de la red es necesario utilizar Redes Virtuales Privadas (VPNs), Sistemas de Detección de Intrusiones de Red (NIDSs), firewalls perimetrales, entre otros. Este último, el firewall perimetral es un sistema diseñado para evitar los accesos no autorizados a una red privada. La idea fundamental de funcionamiento se basa en construir una barrera de seguridad entre redes privadas y la Internet, [Kadhim, 2006].



El firewall es un elemento fundamental en una solución de seguridad perimetral, por lo cual este dispositivo debe poseer las características siguientes, [Zwicky, 2000]:

- Capacidad de monitoreo y notificación.
- Inmunidad a la penetración o subversión.
- Ser robusto en la identificación de ataques de red.
- Capacidad de realizar traducción de direcciones de red (NAT).

Un problema persistente en la investigación en redes de cómputo es la validación. Cuando se desea evaluar una nueva característica o corregir un fallo, un investigador u operador debe hacer uso de algún tipo de escenario, virtualizado, emulado, simulado o real. La simulación y la emulación proporcionan ambientes controlados para ejecutar experimentos repetibles, [White, 2002].

Las desventajas de estos escenarios son la carencia de escala y de realismo, no consideran todo el trayecto hasta el usuario final, tampoco manejan tráfico real generado por los usuarios.

Por otro lado, una cama de pruebas especializada permite realizar pruebas en escala y manejar tráfico real de usuarios. Sin embargo, usualmente están dedicadas a un tipo particular de experimento y pueden requerir una fuerte inversión económica para su implantación. La virtualización puede contribuir a minimizar estos costos y aumentar en gran medida la eficiencia de las pruebas a la vez que se reproduce con mayor exactitud los entornos físicos, [Richmond, 2005].

Sin la infraestructura adecuada para evaluar alguna nueva propuesta es relativamente difícil lograr la transferencia de tecnología desde el laboratorio de investigación a las redes del mundo real.

En este trabajo se consideran escenarios híbridos los cuales incorporan elementos de infraestructura física como servidores Linux, estaciones, dispositivos de capa 2 y 3. Así mismo, se considerarán elementos de virtualización mediante el uso de máquinas virtuales para representar el atacante, por ejemplo usando BackTrack o Kali.

Las máquinas virtuales también se utilizarán para representar servidores vulnerables, para ello se utilizará Metasploitable 2. Bajo este planteamiento, el firewall propuesto en este trabajo podrá ser evaluado adecuadamente a través de pruebas de stress y ataques para confirmar las características que debe de poseer un firewall y que se mencionaron en el punto anterior.

## **2. Métodos**

Existen en la actualidad diversas distribuciones de Linux que han sido creadas especialmente para proteger las redes de cómputo, brindando grandes capacidades de seguridad para administrar una red de la mejor forma y con todos los servicios que se pudieran requerir. Entre estas distribuciones se revisaron, IPCop, Endian Firewall (EFW), ClearOS y Fedora 21; esta última no fue pensada desde su creación para ser exclusivamente firewall, sin embargo, cuenta en su kernel con *iptables*, que permite manejar el firewall a nivel de línea de comandos en Linux. Los firewalls pueden ser evaluados en función de sus actividades y procesos a través de distintas métricas que proporcionan información dentro de un periodo de tiempo. Las unidades de medición pueden incluir conteos, frecuencia, porcentajes o valores físicos.

Diversos estudios muestran la evaluación de firewalls basados en software libre. Ejemplo de esto son los trabajos realizados por Schuettinger, Sampaio y Bernardino. Schuettinger selecciono las distribuciones de IPfire, IPCop y ClearOS; mientras que Sampaio y Bernardino compararon a IPCop, PFSense, Zentyal, [Schuettinger, 2017]; [Sampaio, 2017].

Algunas de las métricas de evaluación a considerar en un firewall son el *throughput* y el *goodput*, que describen tasas de transferencia de datos entre redes; así como la latencia, que describe el tiempo en que un paquete tarda en pasar por el firewall desde el momento que ingresa en él hasta el momento en el que sale.

### **Métricas de evaluación**

Una métrica es una medida tomada en un periodo de tiempo y que proporciona información vital sobre un proceso o actividad. Las unidades de medición pueden

incluir conteos, frecuencia, porcentajes o valores físicos, [Cambra, 2004]. En un trabajo realizado en la Universiti Teknologi Malaysia [Kean, 2002], los autores proponen una metodología de evaluación comparativa para evaluar el desempeño del firewall tomando en cuenta tres distintas métricas: throughput, latencia (*latency*) y goodput, se representan gráficamente en la figura 1:

- **Throughput:** Es la tasa máxima en la capa de red en la cual ninguno de los paquetes recibidos es descartado (dropped) por el firewall sin la activación de las reglas de filtrado. El tamaño del throughput es determinado principalmente por las tarjetas de red y la eficiencia de los algoritmos programados dentro del firewall. La unidad de medición es paquetes entrantes por segundo, [Wenhui, 2013].
- **Latencia (*latency*):** Es el intervalo de tiempo que comienza cuando un paquete ingresa al firewall y finaliza cuando el mismo paquete sale de este. Se mide en segundos.
- **Goodput:** Es la tasa en la cual los paquetes son reenviados a las interfaces de destino del firewall sin tomar en cuenta aquellos que fueron descartados debido a las reglas de filtrado; en otras palabras se puede definir como la tasa efectiva de paquetes transmitidos [Clement, 2011].

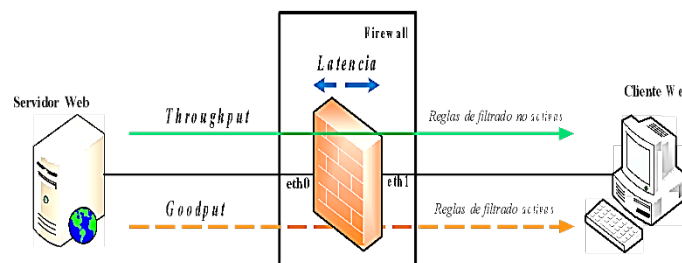


Figura 1 Métricas de evaluación de firewalls.

El throughput y a la latencia se destacan como métricas críticas para evaluar el desempeño del firewall, y se introducen cuatro nuevas métricas de evaluación para satisfacer las necesidades de su evaluación: tasa de establecimiento de conexión, capacidad de conexión concurrente, tasa de transferencia HTTP y tasa de derribe de conexión (Connection Teardown rate), [Snyder, 2010], tabla 1.

Tabla 1 Métricas adicionales para firewalls.

Métricas	Descripción	Importancia
<b>Tasa de establecimiento de conexión</b>	Velocidad a la cual, los firewalls pueden entablar conexiones y el Full Three- way handshake para establecer una sesión TCP/IP. Son multitudes de conexiones que intentan establecer conexión a una red a través de un firewall.	Pueden ser provocadas por un simple clic de aplicaciones web. Si son demasiadas conexiones, el servidor podría saturarse y causar la reducción de velocidad de las aplicaciones.
<b>Tasa de transferencia HTTP</b>	Velocidad a la cual un objeto HTTP solicitado cruza a través del firewall.	Radica en el impacto que tiene el tráfico HTTP en un firewall debido a que es el tipo de tráfico más común que cruza por él.
<b>Tasa de derribe (<i>teardown</i>) de conexión</b>	Velocidad a la cual los firewalls pueden derribar las conexiones y liberar recursos de la red para ser usados posteriormente por tráfico entrante o saliente.	Puesto que cada conexión que se estableció debe ser derribada cuando haya sido filtrada por el firewall, éste último debe mantenerse disponible en ambas direcciones.
<b>Manejo de tráfico ilegal</b>	Comportamiento del firewall cuando se le presenta una combinación de tráfico legal e ilegal.	El firewall tiene la capacidad de filtrar (permitir y descartar) el tráfico bajo la presión de grandes entradas y salidas de paquetes.

Se configuraron cuatro equipos, cada uno con diferente sistema operativo mencionados anteriormente, para realizar pruebas con ellos. Para cada uno se requirieron tres tarjetas de red; para el atacante, la víctima y la de Internet, respectivamente. Por practicidad se manejan direcciones IP comunes entre las interfaces de cada sistema operativo, tanto para la de la víctima como para la del atacante, tal como se expresa a continuación:

- Interfaz del atacante: 192.168.20.1.
- Interfaz de la víctima: 192.168.10.1.
- Interfaz de Internet: 192.168.0.x (Proporcionada por el DHCP)

Para su configuración, en la tabla 2 se muestran los nombres de las interfaces de los diferentes sistemas operativos (firewalls) con los que se trabajaron así como las zonas que se emplearon tanto en Endian como en IPCop.

Tabla 2 Nombres de interfaces en firewalls.

Sistema Operativo (Firewall Linux)	Interfaz de Atacante (192.168.20.1)	Interfaz de Víctima (192.168.10.1)	Interfaz de Internet (192.168.0.x)
Endian Firewall Community 3.0	br2	br0	eth0
IPCop 2.1.5	wan-1	lan-1	wlan-1
ClearOS Community 6.5.0	eth1	eth0	eth2
Fedora 21 (iptables)	enp3s0	enp2s0	enp2s4

Para evaluar los diferentes firewalls que se han manejado, se montó el siguiente escenario con la finalidad de inyectar tráfico sintético a la víctima, a la máxima tasa de transferencia que soporta la red local (1 Gbit Ethernet). Esto permitió comprobar qué tan capaces son los firewalls de soportar grandes tasas de información, así como su viabilidad para ser seleccionados por encima de los demás y comenzar a operarlo en un escenario de tráfico real con la certeza de que proporcionará el máximo rendimiento y confiabilidad. También se agregan a este escenario las herramientas ntop y nload las cuales permiten monitorizar el tráfico de una red en tiempo real; gracias a ntop se pudo obtener resultados gráficos del comportamiento de la red al emplear cada firewall. Cabe mencionar que se utilizó la herramienta hping3 (corriendo desde Backtrack 5 r3) para perpetrar ataques DDoS en el tiempo en que se esté introduciendo a la red la máxima tasa de datos.

Para finalizar, con el fin de evaluar los diferentes firewalls, se les realizaron tres pruebas diferentes de inyección de tráfico a la máxima tasa, con duración cada una de ocho minutos; estas son:

- **Prueba 1:** Solo tráfico de fondo (sin ataque DDoS).
- **Prueba 2:** Con ataque DDoS y con la regla desactivada en el firewall para mitigarlo.
- **Prueba 3:** Con ataque DDoS y con la regla activada en el firewall para mitigarlo.

### 3. Resultados

En la tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la prueba 1 (solo con tráfico de fondo), realizada a los cuatro diferentes firewalls. En las cuatro columnas

de los resultados obtenidos se puede observar una clara superioridad de ClearOS y Fedora 21 sobre IPCop y EFW. Esto puede notarse en que el máximo throughput generado en ClearOS y Fedora 21 estuvo por encima de los 900 Mbit/s, siendo estos de 924.7 y 939 Mbit/s respectivamente, mientras que en los otros dos, por debajo apenas de los 600. De igual manera, las pérdidas de datos en IPCop y Endian rebasaron los 240 Mbit/s, mientras que ClearOS y Fedora 21 tan solo fueron de 0.3 y 16.02 Mbit/s, respectivamente. En cuanto al consumo de memoria, IPCop presentó mejores resultados, seguido por Fedora 21, ClearOS y en último lugar EFW.

Tabla 3 Resultados de firewalls (prueba 1).

Firewall (Prueba 1)	Throughput máximo generado (Mbit/s)	Throughput recibido (Mbit/s)	Pérdida (Mbit/s)	Consumo de memoria (%)
ClearOS	924.7	924.4	0.3	3.963
Fedora 21	939.7	923.68	16.02	3.5
Endian Firewall	594	353.28	240.72	7.296
IPCop	587.3	310.61	276.69	1.83

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la prueba 2, (con ataque DDoS sin regla de mitigación) realizada a los firewalls. Al igual que en la tabla 1 se muestra la superioridad de tanto de ClearOS como de Fedora 21.

Tabla 4 Resultados de firewalls (prueba 2).

Firewall (Prueba 2)	Throughput máximo generado (Mbit/s)	Throughput recibido (Mbit/s)	Pérdida (Mbit/s)	Consumo de memoria (%)
ClearOS	751.7	420.68	331.02	4.210
Fedora 21	749.7	415.33	334.37	3.8
Endian Firewall	594	45.80	548.2	8.521
IPCop	603.6	95.46	508.14	2.512

Por causa del ataque, en los cuatro firewalls se observó un decremento de valores, proporcionales al rendimiento de los equipos en la red y en este caso ClearOS mostró mayor estabilidad y capacidad de transferencia con una tasa de 751.7 Mbit/s (ligeramente por encima de Fedora 21 con 749.7), lo mismo que en la

pérdida de datos, debido a que fueron menores las cifras de ClearOS en comparación con las de Fedora 21; mientras que en los otros dos las pérdidas de datos rebasaron los 500 Mbit/s, lo cual representa en promedio el 88.2% del total de su tráfico máximo generado. Cabe señalar que en esta prueba IPCop demostró su incapacidad para procesar tales cantidades de paquetes, debido a que aproximadamente en el minuto cinco, su sistema colapsó y se reinició automáticamente.

En la tabla 5 se muestran los resultados obtenidos de la prueba 3 (con ataque DDoS con regla de mitigación) realizada a los firewalls. Se puede observar que debido a la activación de la regla, se presentó un aumento en el throughput en ClearOS y en Fedora 21 con respecto a la tabla anterior, asimismo, ocurrió una disminución considerable en la pérdida de datos en ambos firewalls; mientras que los valores de IPCop y EFW en las cuatro columnas de datos se mantuvieron prácticamente iguales con respecto a la prueba 2, solamente en IPCop se obtuvo una reducción del 29.2% en la pérdida de datos y cabe señalar que en esta prueba IPCop presentó estabilidad en su sistema, al igual que los demás.

Tabla 5 Resultados de firewalls (prueba 3).

Firewall (Prueba 3)	Throughput máximo generado (Mbit/s)	Throughput recibido (Mbit/s)	Pérdida (Mbit/s)	Consumo de memoria (%)
ClearOS	836.7	672.21	164.49	4.157
Fedora 21	860.7	709.32	151.38	3.7
Endian Firewall	594.5	45.56	548.94	6.878
IPCop	597.8	238.41	359.39	1.77

#### **4. Discusión**

Las herramientas de software libre empleadas demostraron ser las adecuadas para las pruebas realizadas a los diferentes firewalls, de este modo se logró obtener resultados que muestran la factibilidad de ClearOS para ser implementado en la cama de pruebas. Sin la generación de tráfico sintético se perpetraron ataques DDoS (tipo SYN flood) con hping3, los cuales tuvieron gran efecto de saturación de recursos en el equipo víctima; posteriormente dichos ataques fueron

correctamente mitigados mediante las reglas añadidas a los cuatro diferentes firewalls.

Una vez que se comprobó que tanto los ataques, como la defensa de los mismos funcionaban correctamente, se prosiguió con la evaluación de los firewalls con el apoyo de herramientas de generación de tráfico y de monitoreo de la red. Para ello se efectuaron tres pruebas distintas a cada firewall.

La primera consistió en la generación de tráfico sintético a la máxima tasa de transferencia posible (1 Gbit) desde tres equipos mediante la herramienta iperf en un lapso de tiempo de ocho minutos totales con el fin de comprobar si los firewalls son capaces de entregar a la víctima la misma tasa que fue generada.

La segunda consistió en repetir la primera, pero efectuando un ataque DDoS desde el atacante durante un lapso de tres minutos, tiempo en el que se mide la pérdida de datos que se tiene con respecto a la primera prueba.

La tercera y última prueba consistió en repetir la segunda, con la diferencia de que para esta estuvo activa la regla de mitigación del ataque para comprobar el throughput máximo recibido por la víctima y de este modo determinar la efectividad, estabilidad y rendimiento de cada firewall. Una vez realizadas las evaluaciones a los cuatro firewalls se determinó que la mejor opción fue ClearOS.

## **5. Conclusiones**

Los firewalls de software libre son una buena alternativa cuando se trata de brindar seguridad en una red, es por ello que en este trabajo fueron evaluados cuatro distribuciones Linux que han sido especialmente diseñados para brindar este servicio.

Una ventaja muy grande es que son administrables mediante iptables, el cual permitió la manipulación de las reglas a nivel de línea de comandos, y esto fue útil en el establecimiento de las condiciones para la realización de las pruebas necesarias.

Dichas pruebas, junto con el estudio de las herramientas empleadas, arrojaron resultados que muestran la factibilidad de la elección de ClearOS por encima de las demás distribuciones Linux. Se reveló de este modo la incapacidad tanto de



IPCop como de Endian Firewall de procesar la máxima tasa de transferencia en la cama de pruebas con capacidad de 1 Gbit Ethernet. Aunado a esto, la efectividad de las reglas para contener los ataques perpetrados del atacante a la víctima en estas dos distribuciones (junto con el máximo tráfico de fondo), presentó anomalías en la defensa de los mismos causadas por la sobresaturación del ancho de banda. Esto también debido a que solo son soportados por arquitecturas de 32 bits y están limitadas a ser instaladas solo en equipos de bajas prestaciones. Por otro lado, tanto Fedora 21 como ClearOS, mostraron que son capaces de alcanzar la máxima tasa de transferencia de datos, esto sin tener un consumo de recursos importante que afecte su rendimiento. También se probó su efectividad al mostrar una buena respuesta en la defensa de los ataques con las reglas del firewall, con y sin la inyección del tráfico de fondo generado por la herramienta iperf.

A pesar de que Fedora 21 arrojó resultados similares a los de ClearOS, no cuenta por sí mismo con las herramientas necesarias para la administración y protección de una red; no sucede así con ClearOS, que además de ofrecer iptables en su interfaz gráfica. Cuenta con una completa suite de aplicaciones de software libre con propósitos de seguridad, además de brindar soporte al alcance de todos dentro de una comunidad web dedicada a realizarle mejoras y actualizaciones constantemente; por tal motivo, fue ésta la opción seleccionada.

Este resultado es muy similar al obtenido por Schuettinger, al realizar una comparación de firewalls basados en software libre utilizando unas pruebas de comparación diferentes a los de este estudio, llegando a la conclusión de que Clear OS fue claramente superior a los otros, [Schuettinger, 2017].

Cabe mencionar que el sistema ClearOS es muy utilizado en pequeñas y medianas empresas, con alrededor de 100 a 150 usuarios o dispositivos, y que no están en la capacidad o no tienen como objetivo del negocio destinar muchos recursos a dispositivos de conectividad. Lo cual lo vuelve una buena elección al momento de elegir un firewall para una empresa, como fue el caso de las empresas INVELIGENT y TeamSourcing Cía. en Ecuador, [Erazo, 2015]; [Freire Bastidas, 2015].

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Cambra, R. Metrics for Operational Security Control, SAN Institute. 4, July 2004.
- [2] Clement B. Evaluation of a Virtual Firewall in a Cloud Environment. Edinburgh Napier University. December, 2011.
- [3] Erazo, P., & Rubén, E. Implementación de un sistema de seguridad perimetral para las empresas Teamsourcing Cia. Ltda. con software libre (ClearOS) y desarrollo de las políticas de seguridad basadas en el estándar ISO-27001. (Bachelor's thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Electrónica en Redes y Comunicación de Datos.). 2015.
- [4] Freire Bastidas, D. M. Rediseño de la intranet para la empresa Soluciones Tecnológicas Solteflex sa (INVELIGENT) e implementación de un prototipo utilizando ClearOS (Bachelor's thesis, Quito: EPN). 2015.
- [5] Hickman, B., Newman, D., Tadjudin, S. & Martin, T. Benchmarking. Methodology for Firewall Performance, IETF RFC 3511. April 2003.
- [6] Kadhim D. J. & Hussain W. K. Design and Implementation of a Proposal Network Firewall. Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 2(1), 52-69, 2006.
- [7] Kean, L. E. & Mohd N. S. A Benchmarking Methodology for NPU Based Statefull Firewall, Universiti Teknologi Malaysia. 2002.
- [8] Richard A. Deal. Cisco Router Firewall Security. Cisco Press. 2004.
- [9] Richmond M. ViSe: The Virtual Security Testbed. 2005.
- [10] Sampaio, D., & Bernardino, J. Evaluation of Firewall Open Source Software. In Proceedings of the 13th International Conference on Web Information Systems and Technologies (WEBIST), 356-362. 2017. <http://www.scitepress.org/Papers/2017/63612/63612.pdf>.
- [11] Snyder, J. Firewalls in the Data Center: Main Strategies and Metrics, Opus Network. 2010.
- [12] Wenhui S. & Junjie X. Performance evaluations of Cisco ASA and Linux iptables firewall solutions. Master Thesis. Halmstad University, Sweden, 2013.

- [13] Schuettinger, J. Comparing Linux Firewalls. Collections 2017 Student Project Showcase. SUNY Polytechnic Institute. 2017. [https://dspace.sunyconnect.suny.edu/bitstream/handle/1951/69341/Schuettinger\\_2017StudentProjectShowcase\\_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.sunyconnect.suny.edu/bitstream/handle/1951/69341/Schuettinger_2017StudentProjectShowcase_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [14] White B., et al. An integrated experimental environment for distributed systems and networks. ACM SIGOPS Operating Systems Review 36.SI (2002): 255-270
- [15] Zwiky E., Copper S., & Chapman D. Building Internet Firewalls. Second Edition, O'relly & Association, 2000.

# **AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN**

*AUTOMATED TEST BENCH TO EXTRACT THE PARAMETERS OF AN INDUCTION MOTOR*

***Cristian Emmanuel Jacobo Ruiz***

Universidad Autónoma del Carmen  
*mrodriguez@pampano.unacar.mx*

***Fernando Alberto Peralta León***

Universidad Autónoma del Carmen  
*mrodriguez@pampano.unacar.mx*

***Marco Antonio Rodríguez Blanco***

Universidad Autónoma del Carmen  
*mrodriguez@pampano.unacar.mx*

***Iván Duran***

Universidad Autónoma del Carmen  
*mrodriguez@pampano.unacar.mx*

***José Luis Vázquez Ávila***

Universidad Autónoma del Carmen  
*mrodriguez@pampano.unacar.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta un banco de pruebas automatizado para extraer los parámetros del motor de inducción tipo jaula de ardilla, los cuales son necesarios para simular correctamente el desempeño del modelo físico del motor de inducción integrado en muchas plataformas computacionales como Matlab y PSIM. El banco de pruebas automatizado propuesto es controlado por el software de LabVIEW, el cual a partir de la activación de un botón de inicio, habilita actuadores (relevadores) y sensores (medidor de voltaje y corriente) para llevar a cabo tres secuencias de prueba que son: Prueba de corriente continua, Prueba en vacío y Prueba a rotor bloqueado; obteniendo con ello ciertos datos por cada prueba y posteriormente, con los valores obtenidos, resolver un conjunto de ecuaciones que permiten finalmente

obtener los valores de los parámetros del motor de inducción. *Los valores de los parámetros obtenidos son validados a través de la comparación de la corriente del estator experimental y de simulación.*

**Palabras Claves:** *Automatización, instrumentación, LabVIEW, motor de inducción.*

## **Abstract**

*In this work an automated test bench to extract the parameters of the squirrel cage three phase induction motor is presented. which are necessary to correctly simulate the performance of the induction motor physical model integrated in many computer platforms as Matlab and PSIM software. The automated test bench is controlled by the LabVIEW software, which enables actuators (relays) and sensors (voltage and current meter) to carry out three test sequences that are: 1. DC test, 2. Test without load, and 3. Blocked rotor test. The data obtained sequentially by each test are necessary to solve a set of equations that separately identify each parameter that the complete model of induction motor needs. Finally, the parameters obtained are validated by contrasting the stator current experimental and simulation.*

**Keywords:** *Automation, induction motor, instrumentation, LabVIEW.*

## **1. Introducción**

El motor de inducción, en lo sucesivo MI, es el caballo de trabajo en la industria y su uso es variado en los procesos industriales y frecuentemente se encuentra integrado en muchos procesos críticos [Tuo, 2011] and [Krishnan, 2001]. Una manera de elevar el grado de confiabilidad es por medio de programas de mantenimiento y atención específica mediante un monitoreo permanente del motor, a fin de detectar fallas y evitar errores en el proceso [Bae, 2005]. Por lo anterior, es importante contar con el correcto modelado del MI ya sea para diagnosticar fallas, diseñar controladores o monitorear la degradación [López-Cárdenas, 2009]. En este sentido, el modelo físico del MI implementado en algunos simuladores como *PSIM* y *Matlab* es correcto. Sin embargo, el problema principal es que los parámetros del modelo en la vida real son distintos a los que pudiera ofrecer el fabricante [Ayasun, 2005], por lo que la simulación con esos parámetros en cualquier plataforma será

errónea. La solución a lo anterior, es extraer los parámetros utilizando un set de pruebas eléctricas al MI en cuestión, aunque la metodología es muy elaborada ya que por cada prueba es necesario reconfigurar fuentes de alimentación, trayectorias de conexión y puntos de medición para posteriormente calcular datos de manera secuencial. En la obra [Fraile, 2003] aún no se ha realizado como tal un banco de extracción de parámetros para motores de inducción; solo se maneja información sobre los diferentes métodos con los que se pueden obtener algunos parámetros por separado y no hay nada hasta el momento que permita obtener los parámetros de manera automática. En [Alzate, 2010] se describe un procedimiento llevado a cabo para extraer parámetros de manera óptima basado en un algoritmo bidimensional PSO (Optimización por cúmulo de partículas) el cual es un algoritmo recurrente. Otros autores como [Avalos, 2016] también proponen un sistema de identificación utilizando una optimización multidimensional basado en un modelo GSA (Algoritmo de Investigación Gravitacional) el cual es más complejo computacionalmente que el algoritmo anterior, aunque la calidad de extracción es similar. Sin embargo, las dos referencias anteriores no consideran todos los parámetros físicos de la MI y una implementación automatizada no fue considerada. En este trabajo se propone un banco de pruebas automatizado que permita obtener los parámetros del motor de inducción tipo jaula de ardilla con tan solo presionar un botón. El procedimiento teórico para cada prueba se apegó al estándar de procedimiento de pruebas para motores de inducción polifásico y generadores *ANSI/IEEE std. 112 – 2004*.

### **Motor de inducción trifásico**

Los motores eléctricos trifásicos se fabrican en las más diversas potencias, desde una fracción de caballo hasta varios miles de caballos de fuerza (hp), se les construye comúnmente de manera normalizada para las tensiones de 110 o 220 vca y frecuencias de 50 o 60 hz. Muy a menudo, están equipados para trabajar a dos tensiones nominales distintas. Se emplean para accionar máquinas-herramienta, bombas, montacargas, ventiladores, grúas, maquinaria elevada, sopladores, etc.

Cuando la corriente atraviesa los arrollamientos (placa de los bornes) de las tres fases del motor, en el estator se origina un campo magnético que induce corriente en las barras del rotor. Dicha corriente da origen a un flujo que al reaccionar con el flujo del campo magnético del estator, origina un par que pone en movimiento al rotor. Dicho movimiento es continuo, debido a las variaciones que también son continuas, como la corriente alterna trifásica. Es importante mencionar que el rotor no puede ir a la misma velocidad que la del campo magnético giratorio. Esto se debe a que a cada momento recibe impulsos del campo, pero al cesar el empuje, el rotor se retrasa. A este fenómeno se le llama deslizamiento. Después de ese momento vendrá un nuevo empuje y un nuevo deslizamiento, y así sucesivamente. De esta manera se comprende que el rotor nunca logra alcanzar la misma velocidad del campo magnético giratorio. Es por lo cual recibe el nombre de asíncrono o asincrónico. El deslizamiento puede ser mayor conforme aumenta la carga del motor y lógicamente, la velocidad se reduce en una proporción mayor.

Los motores de corriente alterna y los de corriente continua se basan en el mismo principio de funcionamiento, el cual establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético. El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo, adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan, debido a la interacción con los polos ubicados en el estator, el movimiento circular que se observa en el rotor del motor. Partiendo del hecho de que al pasa corriente por un conductor produce un campo magnético, además si lo ponemos dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse produciendo así la energía mecánica. Dicha energía es comunicada al exterior mediante un dispositivo llamado flecha.

Las ecuaciones que describen al modelo del MI se deducen de las leyes de Kirchhoff y Faraday y nos dan como resultado un conjunto complejo de ecuaciones no lineales [Paresh, 2003]. Pero de manera resumida y en forma matricial se puede expresar como en la ecuación 1.

$$V_{a,b,c} = p\Psi_{a,b,c} + R_s I_{s_{a,b,c}} \quad (1)$$

Donde

$V_{a,b,c}$	Voltaje de fases a, b y c.
$p$	Derivada correspondiente
$\Psi_{a,b,c}$	Flujo magnético por fase correspondiente
$R_s$	Resistencia de estator que existe en cada fase
$I_{s_{a,b,c}}$	Corriente del estator en la fase correspondiente

Adicional a esto,  $\Psi_{a,b,c}$  está en función de varios parámetros constantes que son  $L_r$ ,  $L_s$ ,  $L_m$  y  $R_r$ . Por lo tanto, para simular correctamente el MI es necesario; contar; primero, con un modelo matemático completo y correctamente implementado en una plataforma computacional, y segundo, que la plataforma sea accesibilidad los parámetros del MI. Lo anterior tiene un gran sentido cuando se pretende implementar controladores, diagnosticar fallas o simplemente para observar la degradación de los parámetros.

## 2. Método

El método propuesto para automatizar la extracción de parámetros de un motor de inducción se basa en el diseño de un banco de pruebas instrumentado que permita llevar a cabo tres pruebas eléctricas siguiendo los procedimientos normalizados [ANSI/IEEE, 2004] que a continuación se describen.

### Prueba 1 Corriente directa

Para la realización del ensayo en vacío y a rotor bloqueado, es necesario el conocimiento previo del valor de la resistencia del estator ( $R_s$ ). Para ello se aplica el método de volt- amperímetro. Este ensayo se realiza empleando corriente continua, ya que de esta manera no se induce voltaje en el circuito del rotor evitando que este gire y de igual forma que haya flujo resultante en el mismo; bajo estas condiciones la reactancia de la máquina es cero, quedando así el flujo de corriente limitado únicamente por la resistencia del estator ( $R_s$ ), permitiendo de esta manera su cálculo.



Procedimiento (corriente continua):

- En la figura 1, se tomaron dos de las tres terminales de la máquina de inducción y se ajustó la corriente de sus devanados a diferentes valores, sin exceder la nominal a través de la variación de la fuente de voltaje continua CC.
- Posteriormente, se tomaron los valores de tensión para cada valor de corriente seleccionado. En la figura 2, se muestra la conexión interna de una de las bobinas del estator (alimentando una de las bobinas) y su circuito equivalente.

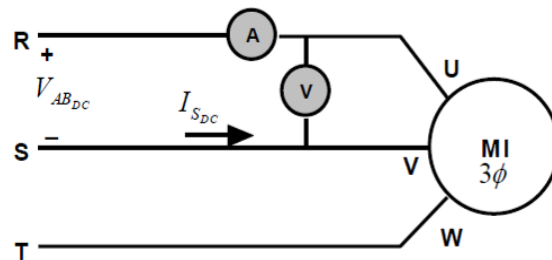


Figura 1 Diagrama del montaje experimental para la medición de la resistencia del estator.

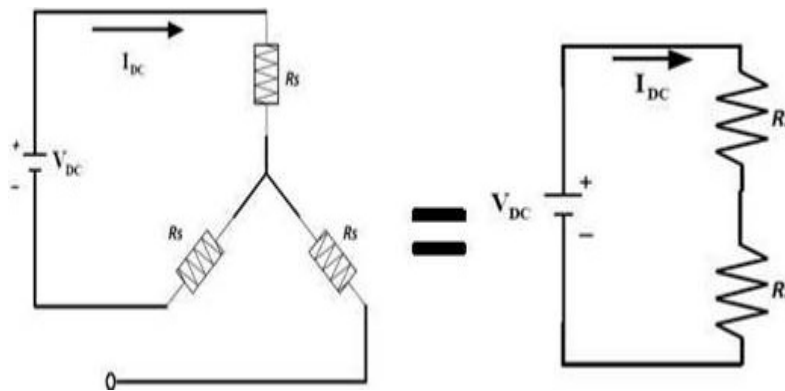


Figura 2 Conexión interna de una de las bobinas del estator y su circuito equivalente.

Partiendo del circuito equivalente de la figura 2, se puede calcular  $R_s$ , utilizando las ecuaciones 2 y 3.

$$\frac{V_{DC}}{I_{DC}} = R_s + R_s \quad (2)$$

$$\frac{V_{DC}}{I_{DC}} = 2R_s \quad (3)$$

Después de haber determinado el parámetro  $R_s$  damos por concluido la primera prueba.

### Prueba 2 Vacío o sin carga

El ensayo en vacío se realiza con la finalidad de obtener el valor de las pérdidas en el rotor, pérdidas magnéticas, corriente de estator, resistencia y reactancia de magnetización de la máquina de inducción de 1 hp. Esta prueba consiste en hacer funcionar a la máquina sin ningún tipo de carga mecánica en el eje; es decir, a rotor libre en vacío. Para esto, se alimenta a frecuencia y tensión nominal en el estator y de esta manera, se obtienen mediciones más precisas de las corrientes de fase, tensión de línea y potencia activa de entrada. En la figura 3, se muestra el esquema de conexión que se emplea en este proyecto.

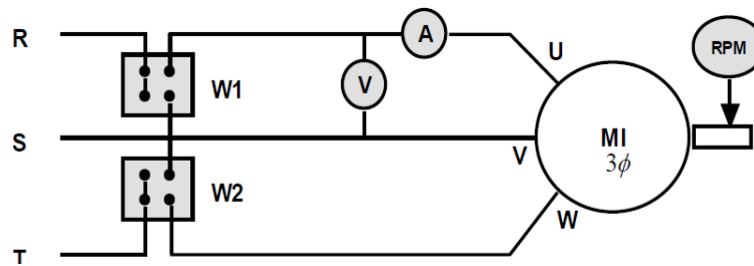


Figura 3 Diagrama del montaje experimental para ensayo en vacío.

### Procedimiento (vacío o sin carga)

Se alimentó el motor de inducción a voltaje nominal y frecuencia nominal, tomando medidas de potencia de entrada, voltaje, corriente de línea y velocidad, ecuaciones 4, 5 y 6.

$$X_{ls} + X_m = |Z_{vac}| = \frac{V_{vac}}{\sqrt{3} * I_{vac}} \quad (4)$$

$$P_{cs,vac} = 3I_s^2 R_s \quad (5)$$

$$P_{rot} = P_{T,vac} - P_{cs,vac} \quad (6)$$

Donde:

- $X_{ls}$  Reactancia de fuga del estator
- $X_m$  Reactancia de magnetización

$P_{CS,vac}$	Pérdidas en el cobre del estator
$P_{rot}$	Pérdidas rotaciones
$P_{T,vac}$	Pérdidas totales en vacío
$V_{vac}$	Voltaje de alimentación en vacío
$I_{vac} = I_s$	Corriente de la línea

### Prueba 3 Rotor bloqueado

Esta prueba es la última en llevarse a cabo, puesto que se necesita del valor de la resistencia del estator para obtener  $R_r$ ,  $X_{lr}$ ,  $X_{ls}$  y  $X_m$  [ANSI/IEEE, 2004]. Para su realización es necesario bloquear el rotor de la máquina de inducción para impedir su movimiento, bajo esta condición, el deslizamiento es uno y la resistencia de carga es cero, lo cual indica que la máquina se comporta como un transformador cortocircuitando el secundario del mismo. En la figura 4 se muestra el diagrama del montaje experimental para ensayo de rotor bloqueado.

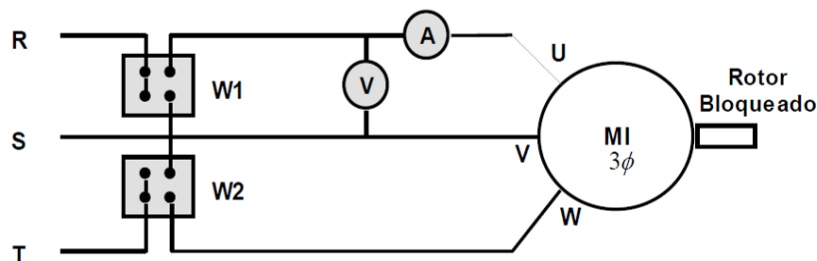


Figura 4 Diagrama del montaje experimental para ensayo de rotor bloqueado.

#### Procedimiento (rotor bloqueado):

El esquema de este ensayo es muy similar al que se utilizó en vacío, la diferencia es que el rotor se bloqueó y se tomó la medición de potencia y tensión al momento en que la corriente alcanzó el valor nominal especificado en los datos de placa de la máquina. Esta medición se realizó con mucha rapidez, debido a que este ensayo puede deteriorar la máquina por el calentamiento excesivo de sus devanados. La frecuencia del inversor que alimenta al motor de inducción se ajustó a la frecuencia mínima en 40 hz; Las ecuaciones que deben tenerse en cuenta son de 7, 8, 9, 10 y 11.

$$|Z_{rb}| = \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} * I_{rb}} \quad (7)$$

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left[ \frac{P_{ent}}{\sqrt{3} V_{rb} I_{rb}} \right] \quad (8)$$

$$R_{rb} = |Z_{rb}| \cos \theta = R_s + R_r \quad (9)$$

$$X_{rb,frb} = |Z_{rb}| \sin \theta \quad (10)$$

$$X_{eq,60HZ} = \frac{f}{f_{rb}} X_{rb,frb} = X_{ls} + X_{lr} \quad (11)$$

Donde:

$ Z_{rb} $	Magnitud impedancia en rotor bloqueado.
$V_{rb}$	Voltaje medido en rotor bloqueado
$I_{rb}$	Corriente medida de la línea.
$\theta_{nl}$	Ángulo de desfase entre $V_{rb}$ y $I_{rb}$
$P_{ent}$	Potencia de entrada a rotor bloqueado
$R_{rb}$	Resistencia total de rotor bloqueado.
$X_{rb,frb}$	Reactancia de rotor bloqueado a frecuencia reducida.
$X_{eq,60HZ}$	Reactancia equivalente a frecuencia nominal.
$R_r$	Resistencia del rotor.
$X_{lr}$	Reactancia de fuga del rotor.
$f$	Frecuencia nominal del motor.
$f_{rb}$	Frecuencia reducida para rotor bloqueado

Es importante mencionar que debido a la reducción de frecuencia (40 hz), las reactancias pueden verse modificadas. Sin embargo, según la norma ANSI/IEEE std. 112 – 2004, para motores inferiores a los 20 hp los efectos sobre las reactancias pueden considerarse despreciables.

### Automatización

El esquema instrumental automatizado propuesto del banco de extracción de parámetros para el MI se muestra en la figura 5 el cual contiene diversas fuentes de alimentación, una DAQ (tarjeta de adquisición de datos), interruptores, freno de

motor, y sensores de corriente, voltaje y velocidad. Además, posee como unidad de control y HMI (Interfaz hombre-máquina) desarrollada en el software de LabVIEW.

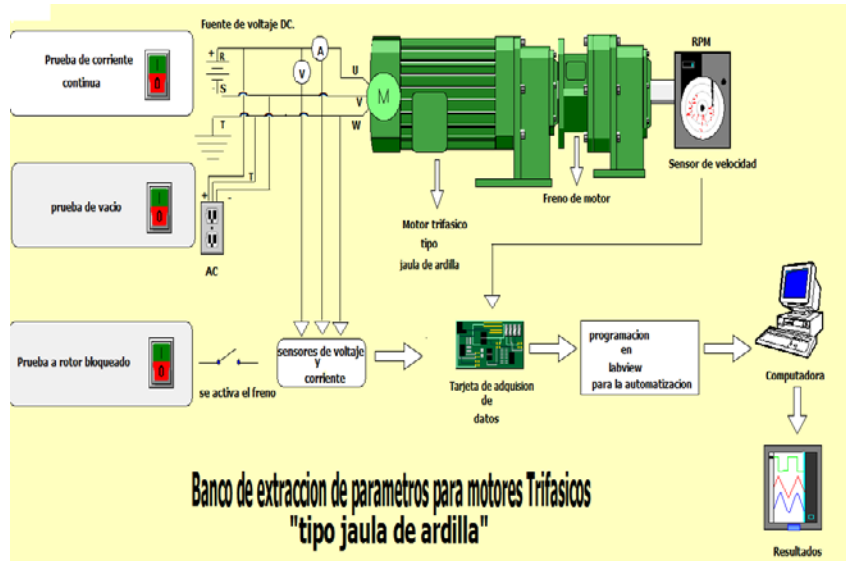


Figura 5 Esquema experimental del banco de extracción de parámetros para el MI.

En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo generalizado del método de extracción de parámetros del MI basado en tres pruebas eléctricas. La prueba comienza a partir de la activación de un botón virtual que por default inicia la rutina de Prueba 1, la cual consiste en activar las trayectorias eléctricas de la figura 1 durante 10 segundos, a la par se inicia un tiempo de asentamiento de relevadores de 2 segundos antes de efectuar la medición rms de corriente y voltaje con la DAQ, en seguida los cálculos son ejecutados en labVIEW y almacenados en una variable global interna con un tiempo de retardo de 3 segundos, mientras se estabiliza la medición y el almacenamiento, luego los relevadores de la Prueba 1 son desactivados hasta antes de completar los 10 segundos que dura la primera prueba para pasar a la siguiente etapa. La Prueba 2 y 3 son muy similares a la anterior, solo que las trayectorias eléctricas para cada prueba hacen referencia a la figura 3 y 4 respectivamente y en la prueba 3 el rotor es bloqueado mediante un freno de polvo activado a través de un relevador adicional.

En la tabla 1 se muestran los datos que se esperan obtener de manera secuencial para la solución final de los parámetros deseados ( $R_s$ ,  $R_r$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  y  $L_m$ ).

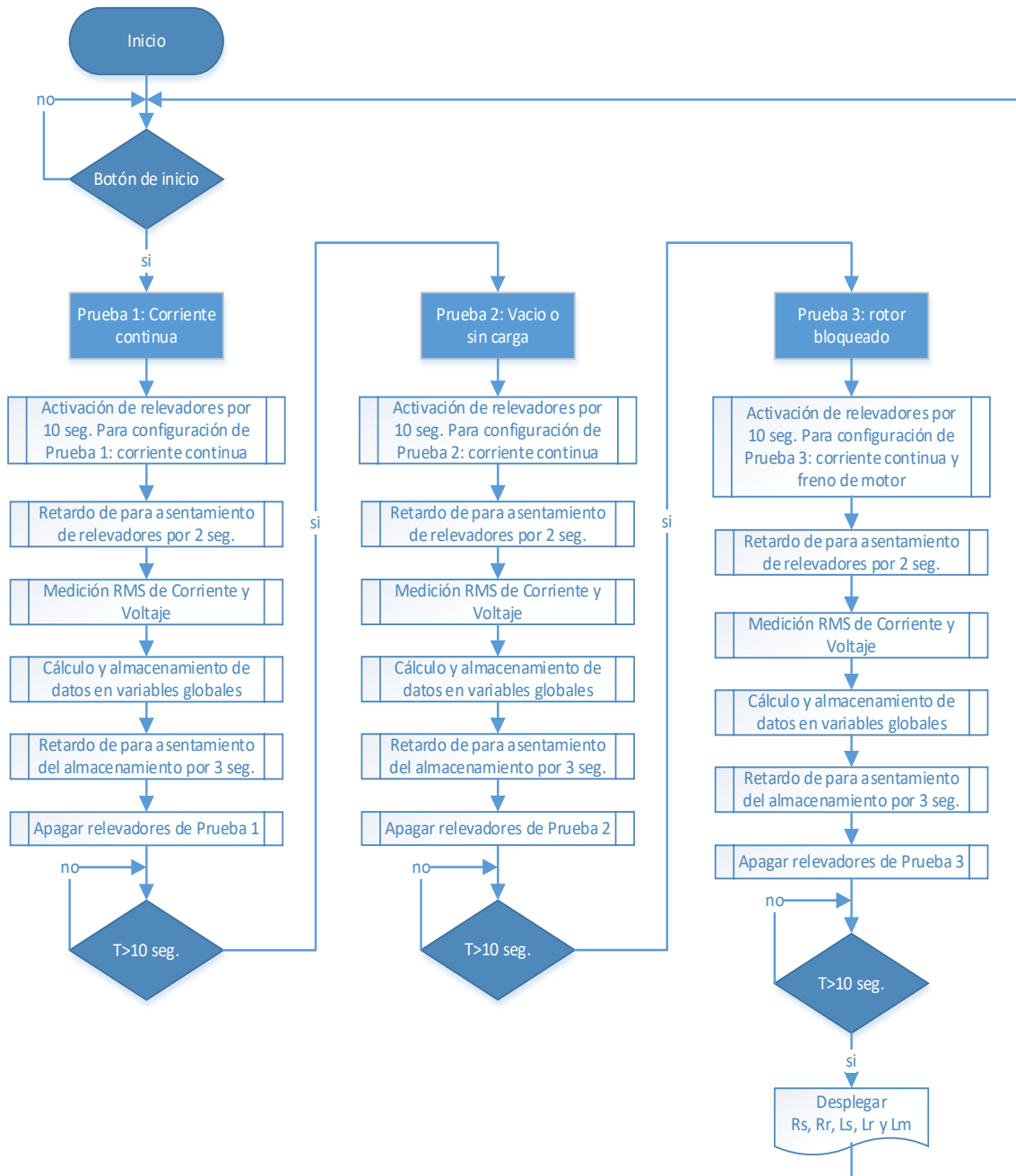


Figura 6 Diagrama a flujo del sistema automatizado propuesto.

Tabla 1 Tabla de resultados esperado.

Pruebas	Parámetros obtenidos
Prueba de corriente continua	$R_s$
Vacío o sin carga	$X_{Is} + X_m, P_{cs,vac}, P_{rot}$
Rotor bloqueado	$ Z_{rb} , \theta, R_{rb}, X_{rb,rb}, X_{eq,60Hz}, R_r, X_{Lr}$ Donde $L = X/\omega$

### 3. Resultados

El resultado más importante de este trabajo es la obtención de los parámetros del modelo del MI de manera automática, la cual se inicia con la activación de un botón “Inicio de pruebas” y al transcurrir 30 segundos, tiempo de ejecución de proceso secuencial, se obtienen los parámetros del MI ( $R_s$ ,  $R_r$ ,  $L_s$ ,  $L_r$  y  $L_m$ ) cuyos datos son necesarios para poder simular el comportamiento real del motor en cuestión. En la figura 7 se muestra la interfaz gráfica donde se aprecia el botón “inicio de pruebas” y los indicadores de valores obtenidos donde destacan los parámetros del MI antes mencionados.

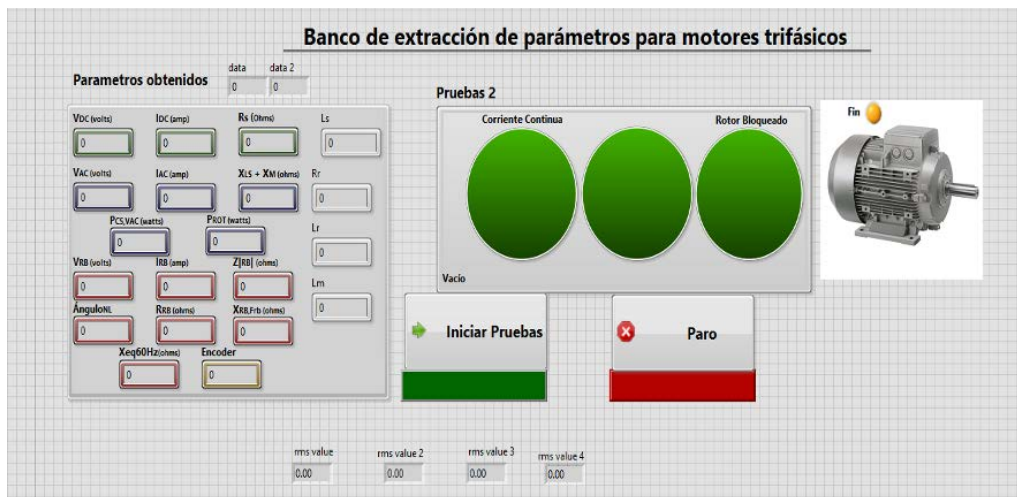


Figura 7 Pantalla del panel frontal en LabVIEW.

Para llevar a cabo el proceso de automatización utilizando la interfaz gráfica anterior es necesario mostrar el hardware y software empleados, los cuales se detallan en las siguientes secciones.

#### Hardware del banco automatizado

La instrumentación del banco de pruebas consiste de; una tarjeta de adquisición de datos DAQ, sensores analógicos de corriente y voltaje, freno mecánico activado eléctricamente y un gran número de relevadores como elementos actuadores que son utilizados para activar rutas eléctricas diferentes por cada prueba. En la figura

8 se muestra la configuración experimental del banco de pruebas automatizado y en figura 9 el diagrama eléctrico para activar las tres fases de prueba.

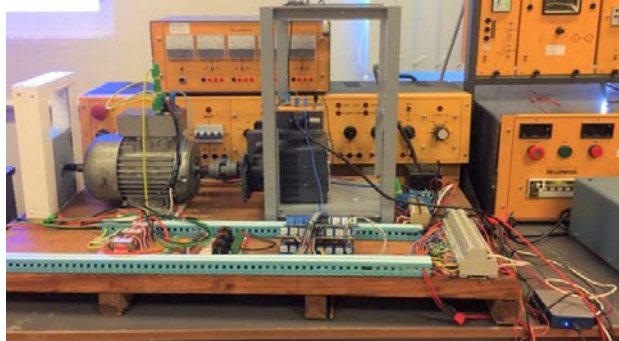


Figura 8 Configuración experimental del banco de extracción de parámetros.

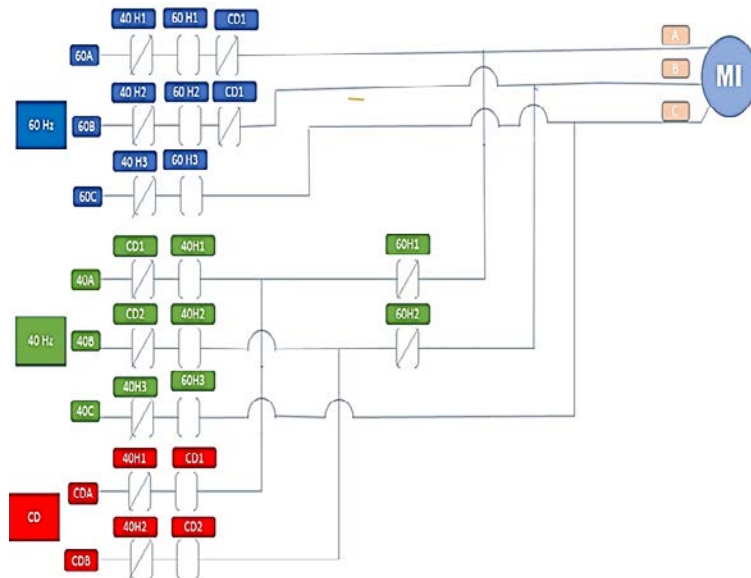


Figura 9 Diagrama eléctrico para activar las tres fases de prueba.

El sensor de corriente utilizado en este trabajo es el CSLA2CD el cual es un sensor de corriente de efecto Hall y radiométrico para medición de corriente alterna CA y corriente continua CC con un rango de 0 a 72 amperes. Para reducir el rango de medición de 0 a 7.2 amperes se le embobinó 10 veces el cable conductor por su núcleo, de esta manera la medición de corriente tendrá un factor 1:10.

Por comodidad, el sensor de voltaje de línea a línea (220 VCA) del MI utilizado en este trabajo consiste de dos transformadores de voltaje de línea a tierra (120 VCA),



como sensores de voltaje, que reducen la medición diferencial a 6 VCA, lo anterior se realizó dado que las magnitudes son bastante altas y con lo anterior se tiene un aislamiento galvánico. La tarjeta de adquisición de datos utilizada en este trabajo es la DAQ de National Instruments serie USB-6003 y el acondicionamiento y calibración de los sensores se realizó ya en el entorno de labVIEW.

Los actuadores son relevadores optoacoplados que diseñan la trayectoria para cada prueba y que a su vez conectan 3 fuentes: una 30 VCD, otra de 220 VCA a 60 hz, otra de 220 VCA a 40 hz y por último conectan el freno para bloquear el eje del motor. La figura 9 muestra el esquema eléctrico que permite llevar a cabo las tres pruebas. Los relevadores (CD1, CD2), (60H1, 60H2, 60H3) y (40H1, 40H2, 40H3) permiten activar las Prueba 1, 2 y 3 respectivamente. es interesante observar que una gran parte de relevadores son para aislar las fases y son redundantes para evitar posibles cortos circuitos.

### **Software del banco automatizado**

Para seguir el proceso del sistema automatizado propuesto de la figura 6, es necesario adecuarlo al entorno de programación de labVIEW. El programa consiste básicamente en una programación secuencial “FIT” implementada sobre una estructura condicional “*case structure*” con 4 condiciones secuenciales de activación; la primera es la condicionante por default que especifica las condiciones iniciales hasta esperar el botón de inicio. Una vez iniciado el proceso, el programa se transfiere al diagrama de bloque de prueba de “*corriente continua*” después al de “*vacío*” y finalmente al programa de “*rotor bloqueado*”. Es decir, se inicializan los canales físicos para cada uno de los “*DAQ assistant*”, se ejecutan secuencialmente iniciando con la activación de cada relevador para después obtener voltaje y corriente, esperar 10 segundos para realizar operaciones matemáticas y por último pasar a la siguiente prueba, siendo similar la forma de ejecución para los procesos siguientes. Uno de los bloques más importantes implementados en labVIEW es un sub bloque donde se encuentran alojadas todas las operaciones matemáticas de la ecuación 1 a la ecuación 11 necesarias para la extracción de parámetros, la clave es llevar a cabo la operación matemática correspondiente por cada prueba y

posteriormente evaluarla y almacenar los datos para disponerlos como entradas en la prueba siguiente hasta terminar el proceso. En la figura 10 se muestran la programación de las ecuaciones implementadas en el sub bloque de ecuaciones.

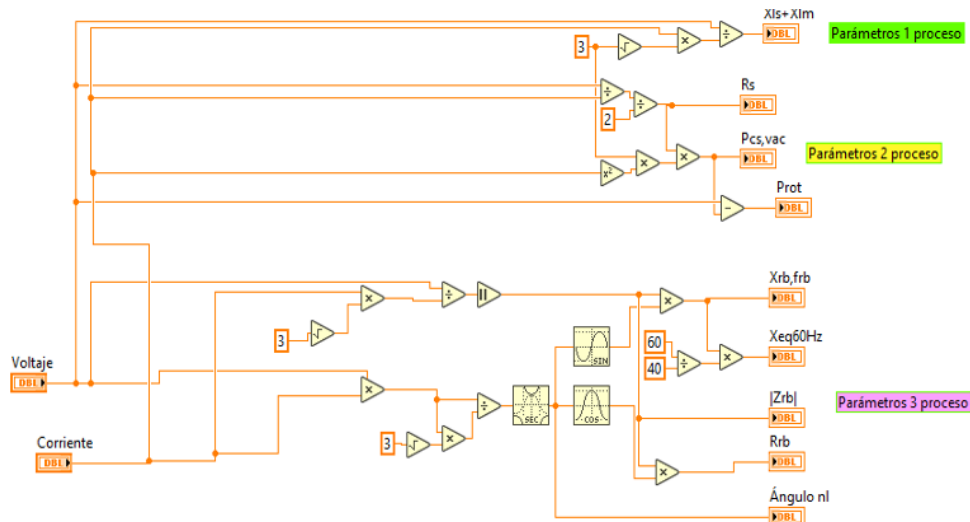


Figura 10 Ecuaciones implementadas en LabVIEW.

#### 4. Discusión

Para validar los datos obtenidos primero se mantiene trabajando al MI sin carga por un lapso de 25 minutos, una vez caliente el motor se realizan un set de 5 pruebas para obtener un valor promedio final para cada parámetro, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Promedio de 5 pruebas con el MI caliente.

Parámetros	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Promedio
$R_s$ (Ohms)	14.0482	14.7664	15.0255	14.5386	14.6056	14.59686
$R_r$ (Ohms)	20.3571	22.8696	17.2162	18.4869	19.8955	19.76506
$L_s$ (hercios)	0.10661	0.11662	0.09990	0.10233	0.10690	0.10647
$L_r$ (hercios)	0.10661	0.11662	0.09990	0.10233	0.10690	0.10647
$L_m$ (hercios)	0.06231	0.06816	0.05839	0.05981	0.06248	0.06223

Después de realizar la obtención de parámetros, estos se introducen en el modelo de MI disponible en PSIM como se muestra en la figura 11. Posteriormente la corriente simulada del estator es comparada con la corriente del estator experimental del motor bajo prueba, como se muestra en la figura 12.

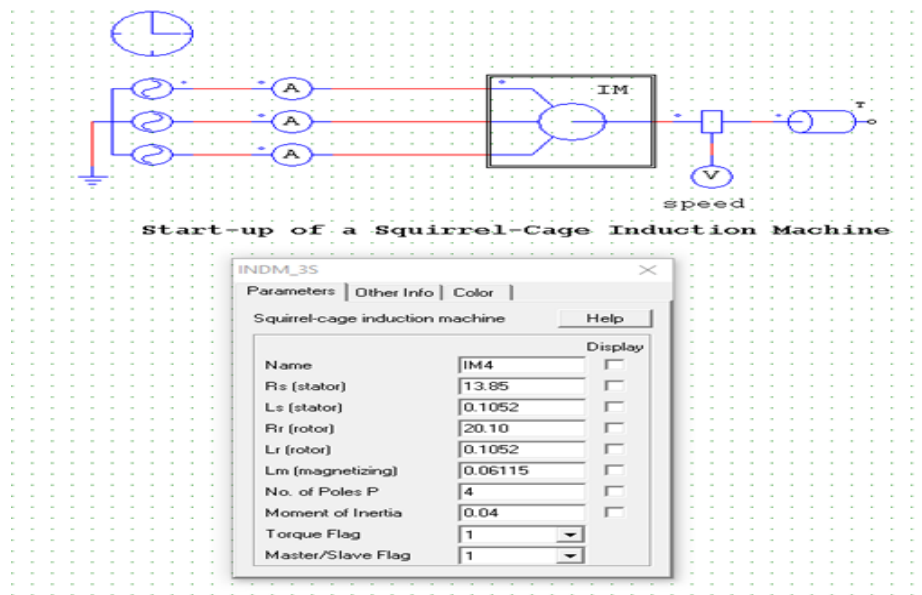
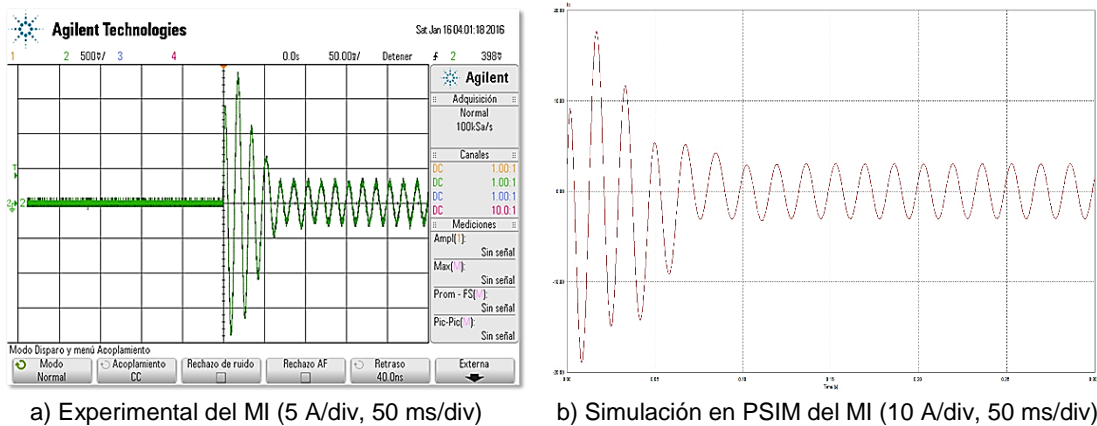


Figura 11 Simulación en PSIM del motor de inducción.



a) Experimental del MI (5 A/div, 50 ms/div)

b) Simulación en PSIM del MI (10 A/div, 50 ms/div).

Figura 12 Comparación de resultados de arranque.

Los resultados de la tabla 2 muestran algunas diferencias significativas de esta el 30% ( $R_r$ ). Sin embargo, estas diferencias son ajenas al proceso de extracción dado que existen dos factores físicos incontrolables que son el desbalance de voltaje en las fases de entrada atribuida a la fuente de alimentación de ca y el desbalance de la corriente del estator atribuido a la asimetría de los parámetros físicos del motor. En este sentido, será conveniente considerar, como trabajo futuro, una adecuación al sistema automatizado para promediar al menos 5 mediciones, lo cual llevará un tiempo de 125 segundos. Con respecto a la calidad de la extracción, en la figura 12.

Se puede corroborar que la corriente de estator simulado es muy similar a la corriente experimental. Sin embargo, en un trabajo futuro, será conveniente cuantificar la calidad de la extracción tanto en el estado estable como transitorio, tomando en cuenta la medición del momento de inercia y la carga mecánica.

## 5. Conclusiones

En este trabajo existen elementos externos, como el desbalance de voltaje en las fases de entrada atribuida a la fuente de alimentación de ca y el desbalance de la corriente del estator atribuido a la asimetría de los parámetros físicos del motor, que interfieren con la repetividad de los valores paramétricos obtenidos. En tanto que la calidad de la extracción no es fácilmente cuantificable dado que es necesario conocer la medición de parámetros mecánicos externos como el *momento de inercia* y la *carga mecánica*. Sin embargo, la automatización para medir indirectamente todos los parámetros eléctricos que permiten simular adecuadamente al MI, fue obtenida en 25 segundo con tan solo presionar un botón.

## 6. Bibliografía y referencias

- [1] ANSI/IEEE std. 112 - 2004 (Revisión of IEEE Std 112-1996): IEEE, Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. EE.UU, 2004.
- [2] Alzate Gómez A, Orjuela Montoya J. A. & Herrera Orozco A. R. Determinación de los parámetros del motor de inducción utilizando un algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (PSO), Revista Tecnura, vol. 14, no. 26, 15-26, 2010.
- [3] Fraile & Jesús M. Maquinas Eléctricas. Quinta edición. Mc Graw Hill, pp. 259-262. capítulo 4, 2003.
- [4] Paresh C. Sen. Principles of Electric Machines and Power Electronics, Ed Wiley, 1989.
- [5] Tuo C. Analysis on the Mathematical Model of the Six-Phase Induction Motor of the Electric Vehicle. Future Intelligent Information Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 86. 2011.

- [6] Krishnan R. *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Prentice Hall. 2001.
- [7] Bae H, Kim Y.T., & Lee S.H. Fault diagnostic of induction motors for equipment reliability and health maintenance based upon Fourier and wavelet analysis. *Artif Life Robotics*, vol. 9, no. 3. 2005.
- [8] López-Cárdenas R., Sánchez-Fernández L.P., & Suárez-Guerra S. Computational Model for Electric Fault Diagnosis in Induction Motors. In *Advances in Computational Intelligence*, vol. 116. 2009.
- [9] Ayasun S. & Nwankpa C. O. Induction Motor Tests Using MAT-LAB/Simulink and Their Integration into Undergraduate Electric Machinery Courses. *IEEE Transaction on Education*, vol. 48, no. 1, 2005.
- [10] Avalos O, Cuevas E & Gálvez J. Induction Motor Parameter Identification Using a Gravitational Search Algorithm. *Computers*. vol. 5, no. 2. 2016.

# INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA Y A LAS REDES NEURONALES CON LOS VEHÍCULOS DE BRAITENBERG

## *INTRODUCTION TO ROBOTICS AND NEURAL NETWORKS WITH BRAITENBERG VEHICLES*

**Joel Ricardo Jiménez Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jcjr@xanum.uam.mx*

### **Resumen**

La enseñanza de la robótica y las redes neuronales artificiales puede despertar, apoyar y motivar el desarrollo de las habilidades en las disciplinas STEAM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte, Matemáticas) en los niños, jóvenes y no tan jóvenes. El aprovechamiento de simulaciones, artefactos electrónicos o robots físicos pueden soportar de manera muy benéfica y demostrativa estas disciplinas. La finalidad principal de este artículo es proponer el uso de los vehículos de Braitenberg como una herramienta didáctica apropiada para exponer de manera introductoria y ágil los principios tanto de la robótica reactiva como de las redes neuronales artificiales.

En este trabajo se plantea el uso de los lenguajes de programación Scratch (para educación básica y media) y Netlogo (para educación media superior y superior) para enseñar estos principios simulando los comportamientos de los vehículos. También se describe la implementación de los comportamientos en el robot físico UAMIBOT utilizando el lenguaje C. Se comentan los beneficios de estas herramientas didácticas en la enseñanza.

**Palabras Claves:** Netlogo, Redes Neuronales Artificiales, Robótica, Scratch, STEAM, Vehículos de Braitenberg.

### **Abstract**

*The teaching of robotics and artificial neural networks can awaken, support and motivate the development of skills in the disciplines STEAM (Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics) in children, young and not so young.*

*The use of simulations, electronic devices or physical robots can support these disciplines in a very beneficial and demonstrative way. The main purpose of this article is to propose the use of Braitenberg vehicles as an appropriate didactic tool to expose in an introductory and agile way the principles of both reactive robotics and artificial neural networks. In this paper, the use of programming languages Scratch (for elementary and junior high school) and Netlogo (for high school and university education) is proposed to teach these principles simulating the behavior of the vehicles. The implementation of the behaviors in the UAMIBOT physical robot using the C language is also described. The benefits of these didactic tools in teaching are discussed.*

**Keywords:** Artificial neuronal networks, braitenberg vehicles, netlogo, robotics, scratch, STEAM.

## **1. Introducción**

La enseñanza de la inteligencia artificial, las redes neuronales y la robótica es muy importante para despertar y desarrollar la vocación STEAM que es un nuevo modelo dinámico de educación que añade a las disciplinas científicas (ciencia, tecnología, ingeniería, matemáticas), las humanidades (artes, diseño). Este modelo educativo es de vital importancia para llevar con éxito estudios a nivel básico, medio y superior, y para el desarrollo y crecimiento sostenido de las naciones [García, Reyes, Burgos, 2017], [Jiménez, 2018]. En este trabajo se muestran los comportamientos de robots que tienen embebido un sistema de control conductual reactivo, que por su relativa simplicidad, puede servir para explicar de manera introductoria los principios o fundamentos de la robótica y de las redes neuronales artificiales (RNA). Para lograr este objetivo, se utilizan los vehículos de Braitenberg (VB) que son criaturas reactivas que muestran comportamientos complejos e inteligentes y lo hacen por medio del uso de lo que pudieran llamarse RNA primitivas [Braitenberg, 1984]. Los conceptos de los VB son muy poderosos, simples y accesibles para los estudiantes sin conocimiento o capacitación previa y transmiten ideas fundamentales de la inteligencia artificial en general y de los sistemas de control de retroalimentación, de la robótica y de las redes neuronales, en particular.

Los robots son sistemas autónomos que habitan en el mundo real, puede sensor o registrar su medio ambiente y actúan en él para alcanzar sus metas o propósitos. Afectan su medio ambiente y son perturbados por él. En la enseñanza de la robótica se explican conceptos como autonomía, adaptación, aprendizaje, navegación y procesamiento senso-motor. La robótica educativa se ha venido utilizando en diferentes contextos; en hogares, en talleres, en colegios y de manera formal, informal, curricular y extracurricular [Ruiz, 2017].

El estudio de los robots se puede llevar a cabo desde tres enfoques principales; el deliberativo o clásico, el conductual reactivo y el híbrido. El enfoque deliberativo pretende que el robot obtenga una representación simbólica del mundo y el enfoque conductual reactivo persigue la idea biológica de que la inteligencia surge de la mediación e interrelación de los comportamientos del robot en su relación con el medio ambiente [Hossian, 2013].

Un robot reactivo es un sistema sin estados (o sin memoria) que tiene la capacidad para reaccionar a situaciones dinámicas, alivia problemas en la calibración de los sensores y efectores y evita los problemas difíciles de la representación del conocimiento en un ambiente no estructurado [Arkin, 1995]. En el lado negativo, el funcionamiento del robot puede resultar sub-óptimo; por ejemplo, un robot puede explorar una región repetidamente sin aventurarse en nuevos territorios, puesto que no tiene memoria de que ya visitó esa región con anterioridad.

Las RNA se pueden utilizar para la generación de comportamientos en los robots, asignando diferentes conexiones y diferentes pesos, con el fin de obtener diferentes comportamientos. En este caso, los comportamientos que tienen pesos más grandes en sus conexiones tienden a relegar o subyugar a los comportamientos que tienen pesos más pequeños. Por lo tanto, los comportamientos podrían priorizarse e integrarse para desarrollar las tareas encomendadas [Wyeth, 1997].

La enseñanza y explicación de los principios de las RNA y la robótica inteligente se puede impartir a niños, jóvenes y adultos utilizando simulaciones apropiadas o robots físicos para cada edad o situación educativa en la que se desee incursionar. En nuestro caso, hemos utilizado a nivel universitario, los lenguajes de programación Scratch y Netlogo y aplicaciones reales en C con el robot físico



UAMIBOT; las simulaciones en Scratch las hemos utilizado en la materia de Fundamentos de la Programación y las simulaciones en Netlogo y la implementación en el robot físico se han empleado en la materia de Inteligencia Artificial.

Por otro lado, para la enseñanza de la programación de simulaciones o de robots se puede utilizar el lenguaje Scratch cuando se trata de niños y adultos no versados, el lenguaje Netlogo en el caso de jóvenes de educación media y C o Python cuando se trata de jóvenes o adultos de educación media o superior. Los robots pueden ser robots físicos comerciales (como Thymio II), robots caseros, kits educacionales (como LEGO) o desarrollos propios electrónicos analógicos o digitales.

En las secciones que siguen, se describe la metodología utilizada, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones y experimentos realizados, se discute su uso en la enseñanza y se concluye con las experiencias obtenidas en este trabajo.

## **2. Métodos**

En esta sección se propone mostrar cómo llevar a cabo la enseñanza de los principios de la robótica y las RNA utilizando los fundamentos conceptuales de los VB y la aplicación en simulaciones o en robots físicos.

Con el uso de los lenguajes de programación Scratch (para educación básica y media) y Netlogo (para educación media y superior) es posible enseñar cómo realizar simulaciones de los comportamientos de los vehículos V2 y V3. El lenguaje C se ha utilizado para programar estos comportamientos en el robot físico UAMIBOT.

### **Los vehículos de Braitenberg**

Los VB son abstracciones y concepciones mentales de vehículos o criaturas que surgieron de los experimentos que realizó el neuroanatomista Valentino Braitenberg en su laboratorio del instituto Max Plank en Alemania en los años ochenta. Su trabajo seminal ha tenido un impacto muy importante en varias áreas del conocimiento relacionadas con la robótica, en lo referente a su concepción, diseño y construcción [Braitenberg, 1984].

Los VB describen una serie de experimentos conceptuales que demuestran cómo el comportamiento inteligente en vehículos o robots puede emerger del acoplamiento senso-motor. Los conceptos básicos de los VB se han utilizado en diversos estudios de robótica y de sistemas multiagentes, tanto en experimentos físicos como en simulados. Por ejemplo, se han utilizado para:

- Localización de una fuente de olor [Lilienthal, Duckett, 2003], [Mamduh et al, 2014], [Takei et al, 2014], [Kamarudin et al, 2014].
- Cobertura de una área para aplicaciones que van de la limpieza en pisos hasta el desminado [Rano, Santos, 2017].
- Cuestiones éticas en dispositivos artificiales sobre la autonomía y la moralidad como el egoísmo y el altruismo, [Headleand, Teahan, 2016].
- Búsqueda [Saavedra, Gutiérrez, Enríquez, 2016].
- Orientación de un pez en un flujo uniforme contracorriente [Salumae, et al, 2012].

La mayoría de los ejemplos de investigación en esta área se ha centrado en los vehículos tipos 2 y 3, por su simplicidad y comportamiento bien definido [Rano, 2012].

En la figura 1 se muestran los comportamientos de los VB; V2 y V3 que se utilizaron en este trabajo. Los comportamientos que pueden surgir de acuerdo al tipo de conexiones (cruzadas o laterales) y pesos (excitatorios o inhibitorios) en sus conexiones son: cobarde o miedoso (V2a), agresivo o de odio (V2b), amoroso (V3a) y explorador (V3b).

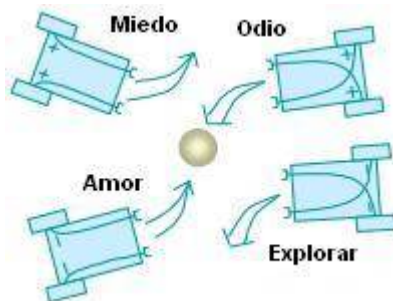


Figura 1 Comportamientos surgidos en los VB debido al tipo de conexiones y pesos.

## Las redes neuronales artificiales

En las RNA se realiza una transformación (lineal o no lineal) de la entrada  $x_i$  para obtener una respuesta  $y_i$  de la forma  $y_i = g(x_i)$ . A la red se le presentan patrones tanto a la entrada y a la salida con el fin de que la red aprenda esta transformación, es decir, se entrena a la red para que reconozca esos patrones de entrada y produzca la salida deseada. La transformación consiste en ajustar los valores o pesos que tienen las conexiones entre las diferentes unidades, nodos o neuronas. El entrenamiento se puede realizar, para redes sencillas y pequeñas, en forma manual y para redes más complejas y grandes se utilizan algoritmos de entrenamiento como el de retropropagación [Ruan, Dai, 2012].

Existen varios tipos de RNA, principalmente [Kröse, Van der Smagt, 1999]:

- Redes supervisadas con aprendizaje dirigido y no supervisadas con aprendizaje autodirigido.
- Redes hacia adelante y con retroalimentación y autoretroalimentación

En las redes primitivas de los VB se tienen redes de una capa con una sola entrada, una sola salida y una función de activación representada por una constante que puede ser positiva o negativa. A su vez, la conectividad que se da entre sus unidades puede ser lateral o cruzada.

En la figura 2 se ilustran las posibles conexiones que se han programado en los diferentes lenguajes para que emerjan los diferentes comportamientos de los VB. En esta figura,  $S_L$  y  $S_R$  son los sensores,  $M_L$  y  $M_R$  son los motores (actuadores) y  $C1$ ,  $C2$ ,  $S1$  y  $S2$  son los pesos de las conexiones. La velocidad del motor está dada por la combinación lineal de la entrada registrada y los pesos entre sus conexiones, que se expresa en las ecuaciones 1 y 2.

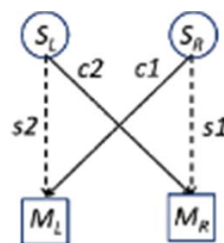


Figura 2 Las posibles conexiones y pesos en las redes de los VB.

$$M_L = C_1 S_R + S_2 S_L \quad (1)$$

$$M_R = C_2 S_L + S_1 S_R \quad (2)$$

Esta conectividad simple es la que produce los comportamientos en los VB y es el principio de la programación de RNAs más complejas. En estas redes simples se observa que los ajustes en los pesos (entrenamiento) es la base para explicar y entender de manera intuitiva cómo se lleva a cabo el aprendizaje en las redes artificiales y en las redes biológicas que están presentes en las máquinas y en los seres vivos, ya sean estas plantas, organismos pluricelulares o seres humanos.

Hay una relación entre las conexiones sensor-actuador y los comportamientos de un robot. Los VB no tienen un proceso explícito de toma de decisiones, el comportamiento del robot depende únicamente de la conexión entre sensores y actuadores.

Aplicando y extendiendo las ideas de las RNAs primitivas de Braitenberg, se puede incursionar en otro tipo de redes neurales más sofisticadas con aprendizaje supervisado que se pudieran utilizar para entrenar a robots que realicen otras tareas. Las redes más sencillas como las de McCulloch y Pitts y las de Rosenblatt fueron criticadas por sus limitaciones e incapacidad para realizar ciertos cálculos computacionales como la clasificación no lineal, pero en realidad se podrían utilizar en los robots con un entrenamiento manual.

Por ejemplo, Wyeth [1997] y Browning, Wyeth [1998] realizaron una mejora en los comportamientos de los VB utilizando las redes de una sola capa Adaline y el Perceptrón. La diferencia en estas redes radica en la función de transferencia de la neurona; en la primera red, las unidades de procesamiento son lineales y la segunda red son no lineales.

En la literatura hay varios estudios que demuestran los beneficios del uso de la programación de agentes o robots simulados o reales como métodos más efectivos, atractivos, motivadores y entretenidos en comparación con la educación sin el uso de ellos. La interacción con estas ayudas didácticas aumentan la motivación, el compromiso y la actitud hacia la educación. Se cree que la enseñanza de la programación desarrolla en los estudiantes habilidades del pensamiento creativo,

de la algorítmica, de la capacidad de abstracción y del pensamiento computacional que involucran el procesamiento de la información y que contribuyen a mejorar las habilidades en la resolución de problemas [Karim, Lemaignan, Mondada, 2015], [López, Andrade, 2013]. Por ejemplo, Çankaya, Durak y Yünkül [2017] evaluaron las opiniones de los estudiantes de bachillerato que aprendieron a programar robots, aplicando una prueba de resolución de problemas similar a la de PISA 2012, una prueba de evaluación de rendimiento al programar y una entrevista. Encontraron una relación significativa positiva entre las habilidades de resolución de problemas de los estudiantes y sus puntajes de rendimiento al programar.

En la sección que sigue se muestran las simulaciones en los lenguajes Scratch y Netlogo y el comportamiento del robot físico UAMIBOT que en su conjunto ejemplifican el uso de los VB como una herramienta didáctica apropiada para exponer de manera introductoria y ágil los principios de la robótica reactiva y de las RNA.

### **3. Resultados**

En las simulaciones y experimentos realizados se hacen una serie de supuestos que simplifican la dinámica de los vehículos. En primer lugar, la velocidad de cada rueda se controla linealmente por el valor que se alimenta al motor; no se da importancia a los efectos de inercia o fricción, ni al comportamiento no lineal del efector. En la simulación, se emula la cinemática del vehículo, no su dinámica. Las colisiones se evitan y no afectan al movimiento del robot. En segundo lugar, los sensores devuelven un valor normalizado ideal que representa la proximidad del objeto al sensor. En los programas de simulación realizados se pueden efectuar cambios en los parámetros de varias entidades, como:

- Medio ambiente- en particular el número y la posición de los obstáculos y objetivos,
- Controlador- incluye el tipo de unidades de activación y la conectividad neural utilizada para cierto comportamiento, y
- Robot- permite la actuación de las ruedas motrices y la posición y alcance de los sensores.

## Simulaciones en Netlogo

NetLogo es un lenguaje de programación y es un medio para simular principalmente fenómenos sociales, ingenieriles y naturales. Se ha diseñado para usarse en la educación y en la investigación. Es adecuado particularmente para modelar, en forma concurrente, sistemas dinámicos que evolucionan en el tiempo. Esto hace posible explorar las conexiones existentes entre las conductas de los agentes y los patrones que emergen a partir de sus interacciones bajo diversas variables y condiciones [Tisue, Wilensky, 2004].

Algunos de los temas que se han estudiado y simulado en Netlogo incluyen a los autómatas celulares, la teoría de juegos, la computación evolutiva, los sistemas de control con retroalimentación positiva y negativa, la dinámica de poblaciones [Pérez, Jiménez, 2013], la optimización, la autoorganización, la vida artificial, la inteligencia artificial, la evolución, las redes, los mercados, el caos. Los modelos comparten el tema de los sistemas complejos y de los fenómenos emergentes.

En este trabajo, sugerimos que Netlogo se puede utilizar convenientemente para enseñar a programar las simulaciones de los comportamientos cobarde, agresivo, amoroso y explorador de los VB.

Un extracto del programa utilizado en las simulaciones se muestra en la tabla 1.

En las simulaciones se tiene como objeto de búsqueda una luz, pero bien podría tratarse de una sustancia química, un alimento, etc.

Tabla 1 Códigos correspondientes a la definición de los comportamientos de los VB.

<pre>if conducta = "covarde" [   set motor-izq (pesoW * sensor-izq);   set motor-der (pesoW * sensor-der); ]</pre>	<pre>if conducta = "agresiva" [   set motor-izq (pesoW * sensor-der) ;   set motor-der (pesoW * sensor-izq) ; ]</pre>	V2
<pre>if conducta = "amorosa" [   set motor-izq (0.6 - pesoW * sensor-izq);   set motor-der (0.6- pesoW * sensor-der); ]</pre>	<pre>if conducta = "exploradora" [   set motor-izq (0.6- pesoW * sensor-der);   set motor-der (0.6- pesoW * sensor-izq); ]</pre>	V3

En la figura 3 se presenta la simulación realizada en Netlogo que muestra como el vehículo V2a cobarde o temeroso se acerca y se aleja de la fuente de luz, mientras que el vehículo agresivo V2b irrumpe sobre la fuente de luz. En estas simulaciones se puede apreciar la respuesta autónoma del vehículo en base al procesamiento senso-motor que realiza y a la interrelación con su medio ambiente.

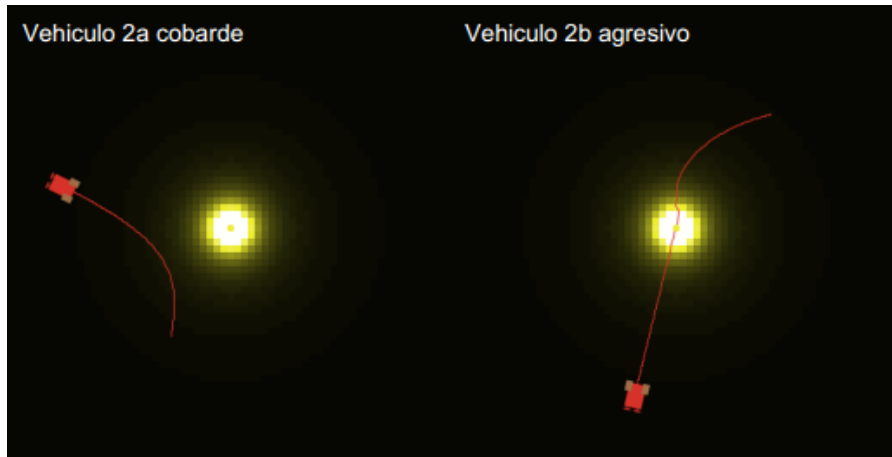


Figura 3 Comportamiento del vehículo V2.

En la figura 4 se pueden observar las conductas amorosas del vehículo V3a que se detiene frente a la luz y las conductas exploradoras del vehículo V3b. Estas conductas ejemplifican los conceptos de navegación y búsqueda que en un momento determinado se desean implementar de manera autónoma e inteligente en aplicaciones de robots en ambientes físicos o virtuales en Internet.

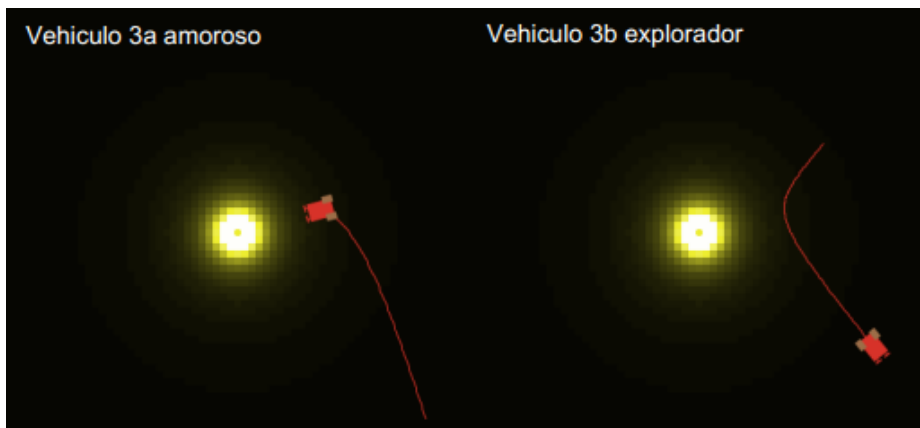


Figura 4 Corridas en Netlogo del vehículo V3.

## Experimentos de los VB con el robot UAMIBOT

El robot móvil UAMIBOT tiene varios sensores y dos motores. Entre los sensores se encuentran dos fotosensores LDR. En el microcontrolador PIC, se descargaron, con el apoyo del Compilador C CSS versión 4.130, los programas de los VB que se codificaron en el lenguaje C, [Jiménez, Cruz, 2013].

En los programas se incluyen librerías generales para la tarjeta de control y librerías particulares del robot para la lectura de los sensores y la activación de los motores. Una parte de código en C para el robot UAMIBOT con la cual se implementa el vehículo amoroso V3a (a mayor intensidad de luz, el robot se va deteniendo y a menor intensidad de luz, el robot va avanzando a mayor velocidad):

```
while (true) {                               // Comienza ciclo infinito
/* Se activa la entrada analógica RA5 para medir la intensidad de luz
  de la fotocelda Izquierda*/
set_adc_channelv(5);
delay_us(20);                               // Retraso para estabilidad del canal analógico
LDR5 = read_adcv(); // Se lee el canal analógico
set_adc_channelv(6); // Se activa la entrada de la fotocelda RA6 Derecha
delay_us(20);                               // Estabilización del canal analógico
LDR6 = read_adc(); // Lectura de la conversión AD del canal analógico derecho
Avanzar(LDR5/20,LDR6/20); /*Rutina creada en librería para avanzar en función de
  la luz (1/20: factor de conexión entre sensor (fotoresistencia) y actuador (motor)*/
delay_ms(300);                               // El robot se pone en movimiento
}                                             // Fin del ciclo
```

En la figura 5 se muestran fotografías del comportamiento del vehículo V3a programadas en el lenguaje C en el robot UAMIBOT. Con la ayuda de un celular se muestra la respuesta reactiva del robot ante el estímulo luminoso. Físicamente se siente como si el robot respondiera de manera inteligente ante la situación imperante en el medio ambiente.



Figura 5 Fotos que ejemplifican el comportamiento amoroso del vehículo V3a.



## **Simulación con el lenguaje de programación Scratch**

Scratch es un lenguaje de programación apropiado para niños o personas que empiezan a programar por primera vez. Cuenta con lo necesario para el desarrollo de juegos, historias interactivas, arte gráfico, animación y proyectos multimedia en general. Los programas se crean ensamblando bloques en un entorno gráfico que incluyen una gran colección de imágenes, sonidos y una herramienta (parecida a Paint) para crear dibujos, producir música y editar efectos de sonido.

Los programas en Scratch se construyen a partir de bloques gráficos que se van encajando uno a continuación del otro. Estos bloques son como piezas de rompecabezas por que la forma en que se acomodan y que hacen cierto sentido, previniendo de hacer combinaciones inválidas. De esta manera se mantiene una sintaxis de programación apropiada para que los nuevos programadores aprendan la forma correcta de ensamblar y formular la lógica de programación. Con scratch se logran aprender principios y técnicas de programación que se pueden aplicar posteriormente en otros lenguajes de programación.

Scratch cuenta con 8 bloques de programación; 3 bloques están destinados a las estructuras generales de programación (Operadores, Eventos, Control), 4 bloques se utilizan para la programación de multimedia (Movimiento, Apariencia, Sonido, Lápiz) y un bloque para la utilización de Sensores.

Como un ejemplo de aplicación en el lenguaje Scratch se implementó el VB amoroso.

En la figura 6 se expone el comportamiento del vehículo amoroso simulado en Scratch. La interfaz con el usuario se divide principalmente en tres partes o columnas; en la primera se observa el funcionamiento del programa con los objetos o sprites creados; en la segunda, los bloques disponibles para realizar un programa; y en la tercera columna se aprecia el script correspondiente al objeto luz.

En el programa se codificó que la luz se quedara en un lugar por 5 segundos y luego cambiara de lugar aleatoriamente. El objeto nombrado Vehículo también tiene asociado un código que le permite dirigirse hacia la luz. En particular, en esta simulación se puede apreciar la navegación y el procesamiento senso-motor que tiene el robot en función de la relación con su medio ambiente.

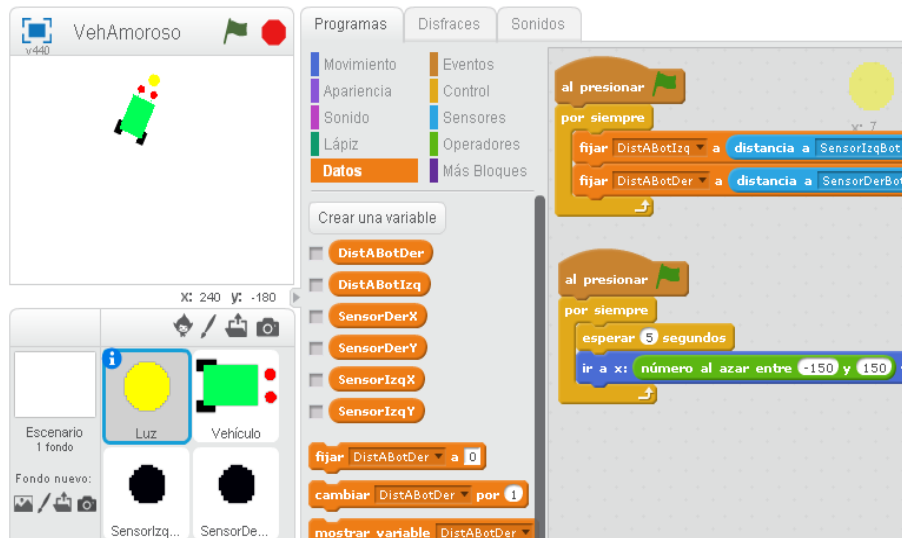


Figura 6 Implementación del VB amoroso en Scratch.

Los principios teóricos de las RNA y de la robótica, así como las simulaciones y los experimentos que en este trabajo reportamos, los hemos utilizados en clases a nivel universitario; las simulaciones en Scratch las hemos empleado en la materia de Fundamentos de la Programación y las simulaciones en NetLogo y el uso de C en el robot físico se han implementado en la materia de Inteligencia Artificial. En cualquiera de los casos se procede inicialmente a familiarizarse con la teoría tanto en clase, como en las tareas que se dejan, a continuación se proporcionan fragmentos de código para que los alumnos implementen las partes que faltan para completar el experimento.

En la entrega de los reportes correspondientes y en la observación de su avance académico en el laboratorio, se ha constatado que los alumnos comprenden y asimilan mejor el material teórico al realizar los experimentos prácticos.

#### 4. Discusión

La enseñanza de los VB y su programación con RNA primitivas puede utilizarse para mostrar otros temas avanzados. Por ejemplo los comportamientos de los VB pueden usarse para simular la cognición, debido a que su comportamiento se puede describir y estudiar en términos psicológicos. Como se ha visto en los experimentos realizados; ligeros cambios en las conexiones de las redes de estos vehículos

producen cambios significativos en su comportamiento. Esta idea se puede generalizar para comprender como funcionan la plasticidad y el aprendizaje cerebral.

Los comportamientos de los VB están relacionados con sus mecanismos internos que son deterministas, pero las interpretaciones de un observador externo pueden ser diferentes a los mecanismos programados. Estos comportamientos aparentemente sofisticados pueden surgir a partir de elementos muy simples y de la interacción del agente con su entorno. Por otro lado, hay que tomar en cuenta que las señales que se obtienen de los sensores en el mundo real son a menudo muy ruidosas y correlacionadas sólo hasta cierto punto con las variables que se desean medir [Pfeifer, 1997].

La autonomía que se observa en las simulaciones puede interpretarse como la autosuficiencia de un agente cuando es capaz de sostenerse a sí mismo por un periodo largo de tiempo (por ejemplo, buscando energía cuando ésta se encuentre baja). La autonomía depende también de saber elegir la acción correcta de acuerdo a las circunstancias del medio ambiente y del estado interno del agente.

Los robots autónomos enseñan ideas importantes sobre la inteligencia, como, por ejemplo, que no se requiere de un control central para realizar las tareas encomendadas. En lugar de un control central se producen interacciones entre los controles locales y emerge la auto-organización [Pfeifer, 1997].

Cada tipo de VB puede presentar un comportamiento más complejo en la medida que aumenta la complejidad del entorno. Por ejemplo, la adición de varias fuentes de estimulación modificaría la navegación y la ejecución de las tareas del agente en su medio ambiente. Se puede observar en los VB que el comportamiento adaptable al entorno surge sin necesidad de procesar una gran cantidad de información. Para un observador puede parecer inteligente, pero el vehículo está simplemente reaccionando a su ecosistema, aunque éste sea dinámico e impredecible. En conclusión, se puede decir que un comportamiento complejo puede emerger de mecanismos relativamente simples al interactuar con el medio ambiente.

En otro orden de ideas y en nuestra experiencia, el empleo de las simulaciones y el robot nos han ayudado a darnos cuenta que las interacciones profesor-alumno y

alumno-instrumentos didácticos son fundamentales para lograr una mejor visualización y comprensión de los conceptos teóricos, abstractos y prácticos y para mejorar las experiencias de aprendizaje tanto individuales como colaborativas. Los docentes necesitamos sentirnos cómodos con estos apoyos. Tal comodidad puede lograrse con la selección de la tecnología apropiada, una capacitación adecuada y una participación activa/proactiva.

## **5. Conclusiones**

En la experiencia en clase nos hemos percatado que la exposición de los temas de las RNA y la robótica no es tan sencilla como pareciera. Sin embargo, las simulaciones que se implementaron en Netlogo y Scratch y los experimentos con el robot físico UAMIBOT nos han ayudado para mostrar, integrar, explicar y enseñar estos temas de manera armoniosa y entendible. A los estudiantes les pareció una forma de aprendizaje interesante y hasta cierto punto divertida.

Los lenguajes y plataformas que se han mostrado en este trabajo, pueden apoyar, motivar y ayudar a desarrollar las habilidades en las áreas de STEAM en los niños, jóvenes y no tan jóvenes. Pueden ser de mucha utilidad para introducir los conceptos fundamentales de la robótica inteligente como navegación, evitación de obstáculos, emergencia de la inteligencia, autonomía, procesamiento senso-motor e interrelación con el medio ambiente.

Los conceptos de los VB son muy poderosos, simples y accesibles para los estudiantes sin conocimiento o capacitación previa y transmiten ideas fundamentales de los sistemas de control de retroalimentación, de la robótica, de las redes neuronales y de la inteligencia artificial. Estos principios básicos de sistemas de retroalimentación permiten entender de mejor manera, la interacción de agente o robot con su medio ambiente [Stolkin, Sheryll, Hotaling, 2007].

La introducción de estos temas permite abstraer conceptos importantes que pueden incentivar el diseño e implementación posterior de diferentes aplicaciones robóticas. Por ejemplo, se puede proponer la programación de extensiones o cambios a la arquitectura de Braitenberg que incluya capacidades de selección de acción cuando se involucran más comportamientos [Lambrinos, Scheier, 1995].

La adaptación es también un tema avanzado que puede responder a algunas preguntas de cómo el robot hace frente a las situaciones del mundo real, cómo las aprovecha, cómo explota la física, cómo se beneficia de la dinámica del mundo real, etc., que se podrían incursionar, responder y enseñar en base a los conceptos desarrollados en este artículo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Arkin, R.C. (1995). Reactive Robotic Systems. Article in Handbook of Brain Theory and Neural Networks, ed. M. Arbib, MIT Press, pp. 793-796. <http://www.cc.gatech.edu/ai/robot-lab/online-publications/handbook.pdf>
- [2] Braitenberg, V. (1984). Vehicles: Experiments in Synthetic Psychology. MIT Press. <http://math.hws.edu/vaughn/cpsc/336/docs/vehicles.pdf>
- [3] Browning, B., Wyeth, G. (1998). Neural Systems for Integrating Robot Behaviours. Australian Conference on Neural Networks. <https://pdfs.semanticscholar.org/f153/689af28007a04cd19bf24e9dd7fe777a51b1.pdf>
- [4] Çankaya, S., Durak, G., Yünkül, E. (2017). Education on Programming with Robots: Examining Students' Experiences and Views. Turkish Online Journal of Qualitative Inquiry (TOJQI). Volume 8, Issue 4, October: 428-445. DOI: 10.17569/tojqi.343218. <http://dergipark.gov.tr/download/article-file/357017>
- [5] García, Y., Reyes, D., Burgos, F. (2017). Actividades STEM en la formación inicial de profesores. Nuevos enfoques didácticos para los desafíos del siglo XXI. Diálogos educativos, Vol. 17, Nº. 33. <http://revistas.umce.cl/index.php/dialogoseducativos/article/view/1168>.
- [6] Headleand, C., Teahan, W. (2016). Towards ethical robots: Revisiting Braitenberg's vehicles. SAI Computing Conference. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7556023/>.
- [7] Hossian, A., Monte, G., Olivera, V. (2013). Análisis del Comportamiento de Robots Móviles con RNA. Un Acercamiento desde el Paradigma Reactivo. Revista Latinoamericana de Ingeniería de Software, 1(1): 18-24. <http://sistemas.unla.edu.ar/sistemas/redisla/ReLAIS/relais-v1-n1-p-18-24.pdf>

- [8] Jiménez, J. (2018). STEAM y las culturas Making, Tinkering y Do it Yourself. Memorias del XXXI Simposio Internacional de TIC en la educación, SOMECE. <http://www.telematica.ccadet.unam.mx/someceweb/#/reader/chapter/874>.
- [9] Jiménez, J., Cruz, D. (2013). UAMIBOT: un robot móvil didáctico multifunciones. *Avances de Ingeniería Electrónica*. SENIE 2013. <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/jcjr/UamiBotSENIE13.pdf>
- [10] Kamarudin, S.M., K., Shakaff, A.Y.M., Zakaria, A., Abdulla A.H. (2014). Comparison of Braitenberg Vehicles with Bio-Inspired Algorithms for Odor Tracking in Laminar Flow. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 8(4), Pages: 6-15. [https://www.researchgate.net/profile/Syed\\_Muhammad\\_Mamduh\\_Syed\\_Zakaria/publication/261672644\\_Comparison\\_of\\_Braitenberg\\_Vehicles\\_with\\_Bio-Inspired\\_Algorithms\\_for\\_Odor\\_Tracking\\_in\\_Laminar\\_Flow/links/0a85e534f6ca0d99fb000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Syed_Muhammad_Mamduh_Syed_Zakaria/publication/261672644_Comparison_of_Braitenberg_Vehicles_with_Bio-Inspired_Algorithms_for_Odor_Tracking_in_Laminar_Flow/links/0a85e534f6ca0d99fb000000.pdf).
- [11] Karim, M., Lemaignan, S., Mondada, F. (2015). A review: Can robots reshape K-12 STEM education?, *IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pp. 1-8. doi: 10.1109/ARSO.2015.7428217. [https://infoscience.epfl.ch/record/209219/files/2015\\_ehsan\\_CanRobotsReshapeStemEducation.pdf](https://infoscience.epfl.ch/record/209219/files/2015_ehsan_CanRobotsReshapeStemEducation.pdf)
- [12] Kröse, B., Van der Smagt, P. (1999). *An Introduction to Neural Networks*, University of Amsterdam, Faculty of Mathematics & Computer Science, The Netherlands. Eighth Edition. <https://www.infor.uva.es/~teodoro/neuro-intro.pdf>
- [13] Lambrinos, D., Scheier, Ch. (1995). *Extended Braitenberg Architectures*. Technical Report AI Lab no. 95.10, Computer Science Department, University of Zurich. <http://www8.cs.umu.se/kurser/TDBD17/VT06/utdelat/Assignment%20Papers/Extended%20Braitenberg%20Architectures.pdf>.
- [14] López, P., Andrade, H. (2013). Aprendizaje con robótica, algunas experiencias. *Revista Educación* 37 (1). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44028564003>
- [15] Rano, I., Santos, J. (2017). A biologically inspired controller to solve the coverage problem in robotics, *Bioinspiration & Biomimetics*. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3190/aa714c/pdf>.

- [16] Lilienthal, A., and Duckett, T (2003). "Experimental analysis of smelling braitenberg vehicles," In Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003), pages 375–380, Coimbra, Portugal. [www.ra.cs.uni-tuebingen.de/publikationen/2003/lilien03icar2003\\_col.pdf](http://www.ra.cs.uni-tuebingen.de/publikationen/2003/lilien03icar2003_col.pdf).
- [17] Pérez, J., Jiménez, J. (2013). Modelado y simulación preliminar del asentamiento poblacional en una entidad del estado de México. *Avances de Ingeniería Electrónica. SENIE 2013*, páginas 452 – 463. <http://sgpwe.izt.uam.mx/pages/cbi/jcjr/archivos/ModeloNetLogoSENIE13.pdf>
- [18] Pfeifer, R. (1997). Teaching powerful ideas with autonomous mobile robots. *Journal of Computer Science Education* 7: 161-186. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=AD5D837752AD262DBBEDCB56A84FADF3?doi=10.1.1.55.8798&rep=rep1&type=pdf>.
- [19] Rano, I. (2012). A Model and Formal Analysis of Braitenberg Vehicles 2 and 3. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 910-915. <http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/data/documents/rano12model.pdf>.
- [20] Ruan, X., Dai, L. (2012). Vehicle Study with Neural Networks. *International Conference on Solid State Devices and Materials Science. Physics Procedia* 25: 814-821. doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.162. <https://core.ac.uk/download/pdf/82017621.pdf>.
- [21] Ruiz, F. (2017). Diseño de proyectos STEAM a partir del currículum actual de Educación Primaria utilizando Aprendizaje Basado en Problemas, Aprendizaje Cooperativo, Flipped Classroom y Robótica Educativa. Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de la Educación, Universidad CEU Cardenal Herrera de Valencia, España. <http://dspace.ceu.es/handle/10637/8739>
- [22] Saavedra, M., Gutiérrez, M., Enríquez, L (2016). Análisis de comportamientos de vehículos de Braitenberg para búsqueda robótica usando el robot lego EV3. *Fides Et Radio*, Vol 12, páginas 155-166. <http://ucbconocimiento.ucbcbba.edu.bo/index.php/FER/article/view/1193>.
- [23] Salumae, T., Raño, I., Akanyeti, O., Kruusmaa, M. (2012). Against the flow: A Braitenberg controller for a fish robot. *IEEE International Conference on*

- Robotics and Automation. [https://www.researchgate.net/publication/254041232\\_Against\\_the\\_flow\\_A\\_Braitenberg\\_controller\\_for\\_a\\_fish\\_robot](https://www.researchgate.net/publication/254041232_Against_the_flow_A_Braitenberg_controller_for_a_fish_robot).
- [24] Stolkin, R., Sheryll, R., Hotaling, L. (2007). Braitenbergian experiments with simple aquatic robots, OCEANS, Vancouver, BC, pp. 1-7. doi: 10.1109/OCEANS.2007.4449202. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4449202&isnumber=4449115>.
- [25] Takei, Y., Shimizu, Y., Hirasawa, K., Nanto, H. (2014). Braitenberg's vehicle-like odor plume tracking robot. SENSORS, IEEE. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6985243/>.
- [26] Tisue, S., Wilensky, U. (2004). NetLogo: A Simple Environment for Modeling Complexity. International Conference on Complex Systems, Boston. <http://ccl.northwestern.edu/papers/netlogiccs2004.pdf>
- [27] Wyeth, G. (1997). Neural Mechanisms for Training Autonomous Robots. Proceedings of Mechatronics and Machine Vision in Practice Conference, publ. IEEE Computer. <https://pdfs.semanticscholar.org/7464/d409eda33205185322392de079e08d30a800.pdf>.



# **ARQUITECTURA DE CONTROL CONDUCTUAL PARA AGENTES INTELIGENTES**

## *ARCHITECTURE OF BEHAVIORAL CONTROL FOR INTELLIGENT AGENTS*

**Joel Ricardo Jiménez Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana

*jcjr@xanum.uam.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se simula, por medio del lenguaje de programación NetLogo, el comportamiento adaptativo de un agente inteligente ante su medio ambiente. El comportamiento está regido por una arquitectura de control conductual de inspiración biológica que se implementa a partir de máquinas de estado. Con este tipo de arquitectura, se aborda la problemática de que el agente elija la respuesta conductual más apropiada en función de las circunstancias de su entorno y de la estimulación recibida. Se reporta y compara el funcionamiento del agente a partir de dos experimentos que utilizan 5 escenarios y 4 controladores. Las simulaciones de este comportamiento inteligente se pueden implementar en robots móviles autónomos, en agentes asistentes o tutores, o en aquellos agentes que buscan y recuperan información en bases de datos o en Internet (softbots).

**Palabras Claves:** Agentes inteligentes, arquitectura de control conductual, comportamiento adaptativo, NetLogo, selección de acción.

### **Abstract**

*This work simulates, through the NetLogo programming language, the adaptive behavior of an intelligent agent in its environment. The behavior is governed by a behavioral control architecture of biological inspiration that is implemented from state machines. With this type of architecture, the problem addressed is that the agent chooses the most appropriate behavioral response depending on the circumstances of its environment and the stimulation received. The performance of the agent is reported and compared from two experiments using 5 scenarios and 4*

*controllers. The simulations of this intelligent behavior can be implemented in autonomous mobile robots, assistant agents or tutors, or in those agents that search and retrieve information in databases or the Internet (softbots).*

**Keywords:** *Action selection, adaptive behavior, behavioral control architecture, intelligent agents, Netlogo.*

## **1. Introducción**

La simulación en computadora permite recrear los comportamientos de organismos en los entornos o nichos en los que viven, modelando sus sensores, el procesamiento de información que llevan a cabo y las tareas que realizan [Jiménez, 2018]. Una vez realizada la simulación se puede proceder a implementarla en robots físicos o virtuales o agentes computacionales (softbots) que tiene acceso a fuentes de información y son capaces de verificar y manipular la información obtenida de estas fuentes de acuerdo a las consultas planteadas por los usuarios con el fin de obtener los recursos esperados. Las fuentes de información pueden ser de muchos tipos, incluyendo, por ejemplo, las bases de datos y la información en Internet.

El estudio del comportamiento animal y los experimentos neurobiológicos pueden servir de guía para el diseño y la construcción de sistemas artificiales que logren un comportamiento autónomo y adaptativo: Cuando un animal confronta su entorno, su comportamiento se ajusta continuamente para afrontar las situaciones, necesidades y condiciones del medio ambiente tanto internamente como externamente [Berns, 1996]. Por ejemplo, el alimentarse, pelear, huir y aparearse son cuatro impulsos básicos (conocidos en biología como las 4 Fs) que el organismo puede enfrentar y que determinan sus comportamientos, en este caso, de sobrevivencia [Lorenz, 1986].

En el procesamiento de información que realizan los organismos y los sistemas artificiales están involucrados el cerebro (el controlador), el cuerpo (interacciones internas y externas) y las relaciones biunívocas con su medio ambiente. En los agentes artificiales esta relación tripartita, está representada por la arquitectura de control que incluye: la percepción y actuación selectiva sobre el medio ambiente;

el procesamiento de la información interna y externa y; los sensores, actuadores o efectores.

La selección de la conducta más apropiada por parte del agente es un tema que se conoce como “selección de acción” y es muy importante cuando se desea que el agente exhiba una conducta inteligente y adaptable que considere la predicción y la evaluación de las consecuencias de sus acciones [Vanderelst, 2018]. El mecanismo de selección se coloca en una capa de la arquitectura o se distribuye en sistemas más pequeños, más manejables y flexibles que permiten realizar el arbitraje y priorización de las conductas y que gestionan el mantenimiento, la inhibición y la alternancia de comportamientos cuando se tienen objetivos conflictivos múltiples [Gaudla, 2018].

Las arquitecturas de control inteligente se pueden clasificar en varias categorías: por el tipo de interacción entre módulos de control (por ejemplo, arquitecturas jerárquicas o centralizadas), por el tipo de funcionalidad asignada a cada módulo (por ejemplo, de propósito general o específico) y por la forma en que los módulos interactúan con el entorno externo (p. ej., comportamiento basado en eventos o en procedimientos). La última categoría se puede clasificar en deliberativa, reactiva, híbrida y conductual [Tzafestas, 2018].

La arquitectura de control deliberativo está basada en un conocimiento previo y en la observación interna de los estados y de las acciones, en ella, se genera un plan basado en un objetivo y un modelo estático del entorno. La arquitectura de control reactivo se basa en un modelo estímulo-respuesta que permite al robot o agente ocuparse de entornos muy dinámicos e impredecibles, los comandos de control se generan durante su operación en función de la interacción del agente con el entorno. Una arquitectura de control híbrida combina las ventajas de los enfoques reactivos y deliberativos, al tiempo que disminuye sus inconvenientes individuales, pero su complejidad computacional es mayor. El agente deliberativo genera de forma estática planes que se ejecutarán en tiempo real, reaccionando al entorno. Finalmente, la estructura de una arquitectura de control conductual se implementa a partir de una colección de comportamientos independientes que se auto-organizan para llevar a cabo las tareas encomendadas [Cadavid, 2017].

De estas, la arquitectura reactiva es muy popular por su sencillez, porque responde de manera inmediata a los estímulos del medio ambiente, aun cuando no tienen la capacidad de anticipación, memoria o aprendizaje [Ben-Ari, 2018]. Entre los ejemplos de las arquitecturas reactivas se encuentran las tortugas de Grey Walter en los años 50s, los vehículos de Valentino Braitenberg y las criaturas de Rodney Brooks de la década de los 80s.

Las tortugas de Walter son máquinas especulativas que exploraban su medio ambiente, por medio de sensores de luz y de contacto, así como dos motores uno para propulsarlo y el otro para poder guiarlo en el medio ambiente. El procesamiento se hacía con un circuito analógico de bulbos. Las tortugas exhiben conductas complejas (buscar una luz, alejarse de ella y, evitar obstáculos) [Walter, 1950], [Walter, 1951].

Los vehículos de Braitenberg utilizan conexiones simples excitatorias e inhibitorias entre sensores y motores produciendo comportamientos como agresión, miedo, amor, exploración [Hogg, 1991]. Las criaturas de Brooks están basadas en la arquitectura de sumisión (subsumption), constituida por capas que trabajan en paralelo y que se organizan en forma priorizada por medio de un mecanismo de coordinación competitivo. Los comportamientos muestran un alto grado de inteligencia sin que exista, en realidad, un procesador central [Brooks, 1986], [Jones, 1993].

Actualmente, la arquitectura conductual es la base del diseño de muchos agentes inteligentes, con la cual el agente elige y coordina la conducta más adecuada de acuerdo a los estímulos recibidos y al contexto en el que se encuentra. Por ejemplo, [Cao, 2018] presentan un sistema de control conductual para la interacción del ser humano con robots sociales personalizables que adaptan sus comportamientos a los perfiles de los usuarios y a las respuestas durante la interacción humano-robot. La programación de las conductas de un agente se puede inspirar en la forma en que los animales resuelven el conflicto de la selección de una conducta al momento en que varias unidades funcionales entran en competencia por un conjunto limitado de acciones y sólo una unidad funcional toma el control de las salidas motoras [Jiménez, 2000], [Grillner, 1997].

En este trabajo se explora y efectúa la simulación en NetLogo de un agente que utiliza una arquitectura conductual cuyos módulos se implementan a partir de máquinas de estado. Netlogo se ha convertido en una plataforma estándar para el modelado y la simulación de agentes que permite la exploración de fenómenos emergentes en una gran variedad de campos del conocimiento [Tisue, 2004], [Raglin, 2018].

Las conductas que se exploran son la búsqueda de alimentos, la evitación de obstáculos, el seguimiento de una orilla o pared. Se reporta y compara el funcionamiento del agente a partir de dos experimentos que utilizan 5 escenarios y 4 controladores. Una vez realizadas las simulaciones, la arquitectura conductual se puede implementar en robots móviles autónomos, agentes asistentes o tutores, o en aquellos agentes que buscan y recuperan información en bases de datos o en Internet (softbots).

En las secciones que siguen se expone la teoría y la forma en que están constituidas estas arquitecturas de control conductual y se muestran las simulaciones del agente utilizando esta arquitectura. Finalmente se llevan a cabo la discusión y las conclusiones pertinentes.

## **2. Métodos**

La arquitectura de control conductual se puede inspirar y desarrollar a partir de componentes simples y consistentes, observando la estructura de los sistemas biológicos e imitándola. En la implementación de la arquitectura, los comportamientos se van agregando incrementalmente al sistema, se ejecutan en paralelo y se activan en respuesta a condiciones externas y/o internas, entradas sensoriales y estados internos o mensajes de otros comportamientos. La dinámica de la interacción surge tanto dentro del propio sistema, a partir de la combinación e integración interna de los comportamientos, como de la relación de éstos con el entorno [Prescott, 1999].

Las arquitecturas de control conductual pueden contener componentes reactivos, sin utilizar representaciones complejas. De hecho, la estructura e interacción de los comportamientos internos, produce una representación del mundo externo y de

sus relaciones con él y pueden servir de base para el aprendizaje y la predicción. Esta información se almacena de manera distribuida entre los módulos de comportamientos que componen la arquitectura, a diferencia de los sistemas deliberativos e híbridos que incluyen un planificador deliberativo, un componente reactivo y a veces un sistema motivacional que utilizan un razonamiento o representación centralizada como un mapa global para poder realizar las tareas y planes de contingencia [Rodríguez, 2018].

El poder y la flexibilidad del control conductual proviene, no sólo de los comportamientos, sino también de la forma en que se combinan y se organizan, de acuerdo con las siguientes características [Mataric, 2007], [Feng, 2018]):

- Logran y/o mantienen objetivos conductuales como buscar una ubicación, seguir la pared, esconderse de la luz, recargarse, buscar una pareja, etc.
- Tienen una duración extendida (no instantánea, como en el caso de los sistemas reactivos).
- Toman entradas de sensores y también de otros comportamientos, y envían salidas a efectores y a otros comportamientos, creando redes de comportamientos que "se comunican" entre sí.
- Ejecutan comportamientos en paralelo/concurrentemente en escalas de tiempo compatibles, lo que permite la respuesta en tiempo real.
- Utilizan redes de comportamientos para almacenar estados (presentes y futuros) de manera distribuida y construir modelos/representaciones que generan un comportamiento eficiente (no solo reactivo).
- La estructura y representación es uniforme en todo el sistema (sin conexiones intermedias entre capas, como en los sistemas híbridos).

Un ejemplo del control conductual y toma de decisiones es el trabajo de Randall Beer [Randall Beer, 1991] que implementa la coordinación de comportamientos de una cucaracha artificial (Periplaneta Computatrix) en su medio ambiente a partir de simulación de circuitos neuronales que contienen 78 neuronas y 156 conexiones. Otro ejemplo es, el de [Jiménez, 2017] que modelan y simulan la navegación y la evitación de obstáculos de un insecto artificial por medio de redes neuronales de

espigas utilizando los conceptos de sistemas multiagentes y el entorno de programación Netlogo que permite monitorear y manipular en cada iteración de simulación el estado de cada elemento del circuito neuronal incluyendo:

- Las neuronas y sus variables internas.
- Las sinapsis y sus parámetros.
- Las características de las espigas.

En el presente trabajo se simulan por medio de autómatas o máquinas de estados algorítmica (ASM) las capacidades motoras, sensoriales y de procesamiento de un agente, la evitación de obstáculos, el deambular, el seguimiento de una orilla y la búsqueda y consumo de alimento. El agente tiene sensores de proximidad que modelan las antenas y que le permiten avanzar sin chocar o desviarse de su camino, un sensor de energía que simula el hambre y sensores olfativos y táctiles en la boca que señalan que el alimento está en la boca del agente y además que señala las acciones realizadas por el agente en función de sus condiciones internas y del medio ambiente (figura 1).

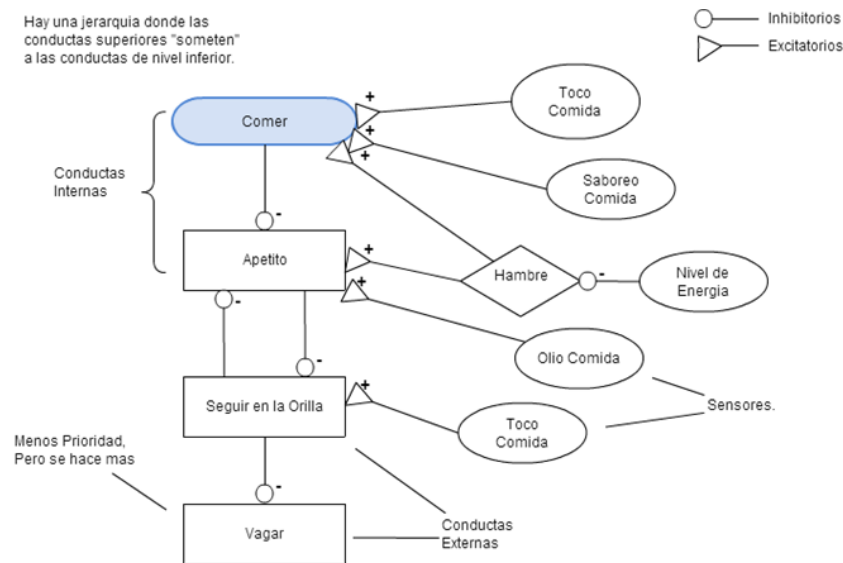


Figura 1 Máquina de estados de las conductas del agente.

Una máquina ASM es un sistema abstracto que puede estar en uno de un número finito de estados. El sistema está en un estado a la vez (el estado actual). Puede

pasar de un estado a otro cuando se produce un evento o condición desencadenante (reglas de transición) [Ben-Ari, 2018b].

Una máquina ASM se define por un conjunto de:

- Posibles estados.
- Posibles transiciones de cada estado.
- Condiciones de activación para cada transición.
- Reglas que rigen el comportamiento del sistema en cada estado.

La máquina de estados muestra las posibles acciones o conductas que el agente puede tomar en función de los estímulos que se van recibiendo. La máquina representa una jerarquía en la cual las conductas de nivel superior pueden inhibir a las conductas de nivel inferior.

Para codificar una conducta, ésta se puede representar por un conjunto  $(E, R, C)$ , donde E denota a los estímulos, R el rango de posibles respuestas y C la función de mapeo:  $C: E \rightarrow R$ . Una respuesta particular r está dada por  $r = D(G * C(E))$ , donde G es la ganancia o fuerza relativa de cada conducta y D es una función de la elección de la conducta que puede ser competitiva o cooperativa. En la función competitiva, las conductas compiten por su activación y puede organizarse por prioridades en forma jerárquica que pueden incluir varias capas o por enlaces libres (redes de conductas) y la función cooperativa se caracteriza por la fusión o integración de conductas [Atkinson, 1998], [Muñoz, 2018].

En este trabajo se codificaron las conductas en forma competitiva, representadas por el siguiente pseudocódigo:

*Repite*

*Vagar ( );*

*Si estás hambriento y tienes el alimento en la boca*

*Consume la comida;*

*Si estas hambriento y hay olor*

*Sigue el rastro;*

*Si hay un contacto con la antena*

*Sigue la orilla;*

*Hasta el final*



### **3. Resultados**

Para la simulación de la arquitectura conductual del agente se utilizó el lenguaje de programación Netlogo (en su versión 6.0.3) que proporciona un entorno integrado de simulación y programación de modelos de agentes múltiples para el estudio del comportamiento emergente en sistemas complejos. El lenguaje de programación Netlogo ofrece un conjunto de primitivas que permite a los agentes percibir y modificar su mundo virtual y también comunicarse e interactuar con otros agentes u objetos [Sakellariou, 2008]. Además de su simplicidad, una de las principales ventajas de usar Netlogo, es que permite monitorear sensores, estímulos y manipular la representación del agente, de su medio ambiente y por ejemplo, analizar las conductas de movimiento, evitación de obstáculos, búsqueda y recolección de comida [Zaharija, 2014].

En el presente trabajo, se realizaron varias simulaciones de las reacciones del agente considerando distintos escenarios, circunstancias, distribuciones de alimento y obstáculos durante un tiempo de 1500 unidades (ticks). En la pestaña de información de Netlogo se van anotando los resultados y observaciones correspondientes a cada experimento.

#### **Características y configuración del escenario y del agente**

En la figura 2 se muestra el escenario donde se encuentra el agente, las líneas de color azul representan obstáculos, las áreas de color verde el olor de la comida y los puntos de color blanco indican la comida o pellets. El agente tiene sensores izquierdo y derecho para oler la comida y sensores de contacto en las antenas izquierda y derecha que se activan cuando el agente toca una línea azul. El agente se pone de color rojo cuando se activa la antena derecha, de color verde cuando se activa la antena izquierda y de color azul cuando se activan ambas antenas. El score determina el número de pellets recolectados o comidos en un tiempo de 1500 ticks. Hay monitores que muestran los estados actuales y siguientes de la máquina de estados. Se tiene un botón que aleatoriza la disposición de la comida en función del escenario. Se disponen de 5 escenarios con los cuales se evalúa el desempeño del agente.



Figura 2 Simulación del agente en NetLogo.

Los números aleatorios que se generan son pseudo-aleatorios y en cierta manera determinísticos, porque repitiendo la misma semilla se generan los mismos resultados aleatorios que son útiles para replicar y constatar el funcionamiento de la simulación.

## Experimentos

En esta sección se reporta el funcionamiento del agente a partir de dos experimentos que utilizan 5 escenarios y 4 controladores: Vagar, ASM1, ASM2, seguir la orilla o pared. El controlador de vagar, camina y cambia su orientación de manera aleatoria. ASM1 avanza hacia adelante, hacia atrás y gira. ASM2 avanza hacia adelante, hacia atrás, gira, sigue el aroma. Seguir la pared es un algoritmo que recorre la pared por la izquierda.

### Experimento 1

Se escogieron 5 escenarios diferentes particularmente interesantes y desafiantes para el agente para que pueda recoger el mayor o el menor número posible de pellets, y así evaluar el desempeño del agente. Se anotó en una tabla: el valor de la semilla para cada escenario que se escogió; el score obtenido y las anotaciones de la conducta del agente (tabla 1).

Tabla 1 Cantidad de pellets recolectados de los controladores desarrollados.

Semilla/escenario	Controlador/Score				Observaciones
	Vagar	ASM1	ASM2	Seguimiento de la pared	
11111	21	24	14	51	Con FSM2 se queda encerrado en un pasillo, cuando sale se mueve en círculo intentando alcanzar un pellet
22222	11	26	22	56	Con Vagar se pierde mucho tiempo golpeando la pared, sin realizar un desplazamiento significativo
33333	29	22	18	44	Con FSM2 solo recorre la mitad izquierda del mundo
44444	24	26	29	58	Con Vagar no entra a un bloque que tenga pellets
55555	14	26	29	12	Con seguimiento de pared se quedó atrapado en una isla
Promedio	19.8	24.8	22.4	44.2	

## Experimento 2

Otro experimento que se realizó consistió en anotar la cantidad de pellets consumida y las observaciones particulares, variando las semillas para cada una de las conductas; vagar (tabla 2), ASM1 (tabla 3), ASM2 (tabla 4) y seguimiento de la pared (tabla 5).

Tabla 2 Conducta de Vagar.

Semilla	Score	Anotaciones
94225	18	Sólo quedó atorado en ocasiones
38698	27	Vagó por casi todo el escenario
94013	14	Quedó atorado en un "callejón sin salida"
82613	25	Vagó por la mitad de escenario por un obstáculo a la mitad del escenario
24720	21	Recorrió casi todo el escenario

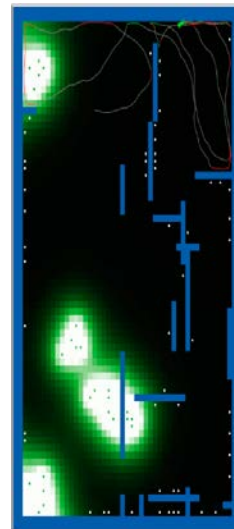


Tabla 3 Controlador ASM1.

Semilla	Score	Anotaciones
32032	24	Vagó por casi todo el escenario
36253	13	Se metió en un cuadro con una salida muy pequeña
83510	19	Vagó por casi todo el escenario
92875	22	Vagó por casi todo el escenario
74757	21	Se metió en un cuadro con una salida muy pequeña con varios pellets

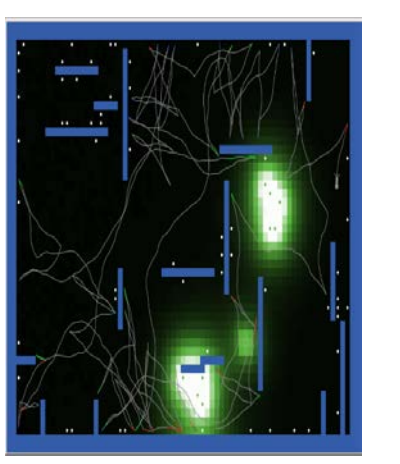


Tabla 4 Controlador ASM2.

Semilla	Score	Anotaciones
25432	22	Comió sólo en dos áreas donde había alimento
76209	27	Comió solo en tres áreas donde había alimento
61118	43	Vagó por casi todo el escenario devorando la mayoría de la comida cuando se encontraba aglutinada en una sola área
92875	22	Vagó por casi todo el escenario
12116	13	Se metió en un recuadro con salida angosta y sólo comió lo que estaba dentro





Tabla 5 Seguimiento de la pared.

Semilla	Score	Anotaciones
96012	4	Se quedó estancado en un obstáculo y sólo se quedó rodeando a éste
54944	43	Rodeó todo el escenario
87780	42	Rodeó todo el escenario
94412	9	Se quedó estancado en un obstáculo y sólo se quedó rodeando a éste
9914	48	Rodeó todo el escenario



## **4. Discusión**

La arquitectura de control conductual que se implementó en este trabajo se estructuró en base a una organización de comportamientos que interactúan con el entorno del agente, con escalas de tiempo similares y sin un control central que opera en paralelo, gracias al procesamiento concurrente que ofrece NetLogo. En este sentido, el control combina y administra la estructura modular y el funcionamiento interno con la dinámica de interacción de los comportamientos del agente con su entorno. De esta manera, los patrones e historia de la interacción pueden interactuar para producir conductas más flexibles, complejas y emergentes.

En los experimentos realizados se observó que la cantidad de comida ingerida depende del controlador empleado y de la distribución de los obstáculos y de la comida. Si los obstáculos están muy cerca, el agente tarda más tiempo en salir de un área determinada, una vez que logra salir, puede explorar nuevamente su medio ambiente con el fin de localizar las fuentes de alimentación.

En los distintos escenarios que se probaron, la mejor estrategia resultó ser ASM2 debido a que incorpora, además del avance hacia atrás y hacia adelante y el giro, la detección del olor de la comida.

Un controlador muy útil, sin duda, es aquel que implementa la conducta de deambular o vagar de manera aleatoria en su medio ambiente. Es una estrategia utilizada por todos los animales y humanos cuando se trata de encontrar un recurso o fuente de alimentación. También resulta muy eficaz el comportamiento implementado por el controlador ASM1 que contiene una búsqueda especializada que consiste en avanzar hacia adelante y cuando el agente queda atrapado, avanza hacia atrás y gira. Por último, la conducta de seguir la orilla o pared también ejemplifica una técnica muy común utilizada por los animales para buscar un objeto o comida.

La arquitectura de control conductual que se implementó se basan en los principios y efectos de la filosofía reactiva sin limitarse a ellos y considerando que los otros paradigmas están definidos por la relación entre el sensor, el planear y el actuar [Mataric, 2007], [Lazzeri, 2018]):

- Los sistemas deliberativos requieren mucho tiempo de procesamiento, una elevada capacidad de memoria y computacionalmente son complejos debido a su representación simbólica del mundo externo.
- Los sistemas híbridos (reactivos y deliberativos) requieren medios de combinación e interacción complejos entre sus componentes.

Como se observó en los experimentos realizados, el agente conductual no cuenta con una representación global del mundo. Se encuentra situado en su medio ambiente y no requiere de descripciones abstractas, cuenta con receptores y efectores adecuados para experimentar e interactuar directamente con su entorno. Su "inteligencia" no está programada explícitamente sino más bien es resultado de las interacciones internas del agente y de las interacciones entre él y su medio ambiente. La "inteligencia" se determina por la conducta total del sistema, es decir, la "inteligencia" emerge [Brooks, 1991].

## **5. Conclusiones**

Las arquitecturas de control pueden ser computacionalmente complejas o sencillas, cada una con sus pros y sus contras, y dependiendo de la aplicación deseada. Cada una de las arquitecturas de control permite a los robots o agentes, en diferentes grados, realizar de manera autónoma o semiautónoma una variedad de tareas en diferentes dominios y aplicaciones [Lee, 2018], [Biro, 2018].

La selección de una arquitectura de control depende principalmente de las propiedades intrínsecas del problema, del tipo de tarea deseada, de la optimicidad requerida y de la información disponible. Además, en la implementación física del robot o agente, puede estar estrechamente relacionado con las restricciones del hardware y software, la morfología del robot y la interacción con el entorno [Melidis, 2018].

En este trabajo se ha implementado y mostrado las bondades de la arquitectura conductual, pero los otros paradigmas también son útiles en diversas aplicaciones. Por ejemplo, los sistemas deliberativos proporcionan un razonamiento y una planificación que viene dada por una representación precisa del entorno. Esto

implica que el entorno no cambia; por lo tanto, estos sistemas son ideales para entornos estructurados y altamente predecibles, especialmente en situaciones donde el agente realiza repetidamente una tarea determinada.

Por otro lado, los sistemas reactivos producen resultados satisfactorios cuando se trata de entornos cambiantes y donde se necesita una respuesta o reacción inmediata en el desempeño de la tarea, como la evitación de obstáculos. Por lo tanto, los entornos cambiantes (estocásticos) se manejan mejor con sistemas reactivos. Además, los controladores reactivos son muy poderosos en entornos y tareas que se han caracterizado de manera anticipada y en donde la carga computacional no es excesiva. Sin embargo, cuando se necesita la representación del mundo y el conocimiento de las acciones pasadas y futuras, se pueden agregar otros módulos que contengan planificación, aprendizaje o memoria [Herrero, 2017].

Finalmente, los sistemas híbridos han demostrado ser una buena opción para entornos que necesitan modelos internos y requieren de una planificación a largo plazo y que, en tiempo real, las demandas del sistema son suficientemente independientes de un razonamiento de alto nivel utilizando lenguajes y sistemas operativos específicos que puedan responder rápidamente en entornos dinámicos [Cadavid, 2017].

En este trabajo, las conductas de deambular, seguimiento de una orilla y búsqueda de alimento se implementaron de manera sencilla y principalmente con fines ilustrativos de la arquitectura conductual. Si se tratara de tareas más complejas, sería necesario incorporar o combinar otras arquitecturas que promuevan la planificación y la supervisión modular con el fin de mejorar la representación del mundo y la adaptación del agente o robot a sus tareas y su medio ambiente [González, 2018].

El control conductual se puede utilizar como una alternativa a los métodos de búsqueda tradicionales tales como tablas hash, búsqueda secuencial, búsqueda binaria, o los métodos empleados por la Inteligencia Artificial clásica como árboles de búsqueda, método de generación y prueba, métodos heurísticos. En ciertas aplicaciones, estos métodos son poco flexibles para responder exitosamente ante

diversas situaciones; no se obtienen buenos resultados cuando los datos son imprecisos, están incompletos o si se pretenden realizar búsquedas más versátiles (por ejemplo empleando sinónimos, o a través de una consulta del usuario). Algunos de los métodos de búsqueda, citados anteriormente, necesitan de una representación en memoria del espacio de búsqueda y tienen una carga computacional elevada [Caballero, 1998].

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Atkinson, J. (1998). Diseño de Agentes Autónomos Utilizando un Enfoque de Control Basado en Conductas. *Revista Facultad de Ingeniería*, núm. 5, pp. 45-54. <http://www.redalyc.org/pdf/114/11400507.pdf>
- [2] Beer, R., Chiel, J., Sterling, L. (1991). An artificial insect. *American Scientist*, Vol. 79(5): pp. 444-452. [http://www.jstor.org/stable/29774478?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](http://www.jstor.org/stable/29774478?seq=1#page_scan_tab_contents)
- [3] Ben-Ari M., Mondada F. (2018a). Reactive Behavior. In: *Elements of Robotics*. Springer, Cham, pp. 39-53. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62533-1\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62533-1_3)
- [4] Ben-Ari M., Mondada F. (2018b). Finite State Machines. In: *Elements of Robotics*. Springer, Cham, pp. 55-61. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62533-1\\_4](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-62533-1_4).
- [5] Berns G.S., Sejnowski T.J. (1996). How the Basal Ganglia Make Decisions. *The Neurobiology of Decision Making*, Eds. Damasio A., Damasio H., Christen Y., Springer-Verlag: <https://papers.cnl.salk.edu/PDFs/How%20the%20Basal%20Ganglia%20Make%20Decisions%201996-2876.pdf>.
- [6] Biro, A. (2018). Combining adjustable autonomy and shared control as a new platform for controlling robotic systems with ROS on TurtleBot. Örebro University Report. Independent thesis Advanced level. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1178533/FULLTEXT01.pdf>
- [7] Brooks, R. (1986). Robust layered control system for a mobile robot, *IEEE J. Robotics and Automation*, RA-2, pp. 14-23. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1087032/>.



- [8] Brooks, R. (1991). Intelligence Without Reason. A.I. Memo No. 1293. MIT. <http://people.csail.mit.edu/brooks/papers/AIM-1293.pdf>
- [9] Caballero, H. (1998). Diseño e Implementación de una Sociedad de Agentes Inteligentes Recolectores de Información. Tesis de Ingeniero en Computación. Universidad Tecnológica de la Mixteca. [http://jupiter.utm.mx/~tesis\\_dig/5152.pdf](http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/5152.pdf).
- [10] Cadavid H., Pérez A., Rocha C. (2017). Reliable Control Architecture with PLEXIL and ROS for Autonomous Wheeled Robots. In: Solano A., Ordoñez H. (eds) Advances in Computing. CCC 2017. Communications in Computer and Information Science, vol 735. Springer, Cham. [https://www.researchgate.net/publication/319138847\\_Reliable\\_Control\\_Architecture\\_with\\_PLEXIL\\_and\\_ROS\\_for\\_Autonomous\\_Wheeled\\_Robots](https://www.researchgate.net/publication/319138847_Reliable_Control_Architecture_with_PLEXIL_and_ROS_for_Autonomous_Wheeled_Robots).
- [11] Cao, H-L., Van De Perre, G., Kennedy, J., Senft, E., Gomez Esteban, P., De Beir, A., ... Vanderborght, B. (2018). A personalized and platform-independent behavior control system for social robots in therapy: development and applications. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, PP(99), 1-13. DOI: 10.1109/TCDS.2018.2795343. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8263227/>.
- [12] Feng, Y., Jia, Q., Wei, W. (2018). A Control Architecture of Robot-Assisted Intervention for Children with Autism Spectrum Disorders. Journal of Robotics, vol. 2018, Article ID 3246708, 12 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/3246708> y <https://www.hindawi.com/journals/jr/2018/3246708/>.
- [13] Gaudla, S., Bryson, J. (2018). The extended ramp model: A biomimetic model of behaviour arbitration for lightweight cognitive architectures. Cognitive Systems Research, Volume 50, Pages 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2018.02.001>.
- [14] González, A. Alves, M., Viana, G., Carvalho, L., Basilio, J. (2018). Supervisory Control-Based Navigation Architecture: A New Framework for Autonomous Robots in Industry 4.0 Environments. IEEE Transactions On Industrial Informatics, Vol. 14 (4): 1732-1743.

- [15] Grillner S. Georgopoulos A., Jordan L. (1997). Selection and Initiation of Motor Behavior. En *Neurons, Networks and Motor Behavior*, eds. Stein P., Grillner S., Selverton A., Stuart D. The MIT Press.
- [16] Herrero, I., Urdiales, C., Peula, J, Sandoval, F. (2017). CBR based reactive behavior learning for the memory-prediction framework. *Neurocomputing*. Volume 250, Pages 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.10.075>
- [17] Hogg, D.W., Martin, F., Resnick, M. (1991). Braitenberg creatures. Technical report E&L Memo No. 13, MIT Media Lab. [http://cosmo.nyu.edu/hogg/lego/braitenberg\\_vehicles.pdf](http://cosmo.nyu.edu/hogg/lego/braitenberg_vehicles.pdf).
- [18] Jiménez J, Espinosa I. (2000). Arquitecturas de selección de acción inspiradas en el sistema nervioso de los vertebrados. *Memorias del II simposio internacional en tecnologías inteligentes. ISIT 2000, Apizaco, Tlaxcala*. <http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/jcjr/ArqSelapizaco00.pdf>.
- [19] Jiménez, J. (2018). Simulación de estrategias de búsqueda en animales con posibles aplicaciones en computación y robótica. *Pistas Educativas*, Vol. 39, Núm. 128, pp. 829-847. <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1168/984>.
- [20] Jiménez C., Johnson, J. (2017). SpikingLab: modelling agents controlled by Spiking Neural Networks in Netlogo. *Neural Computing and Applications*. Volume 28, Supplement 1, pp 755–764. doi: 10.1007/s00521-016-2398-1. [https://www.researchgate.net/publication/303846142\\_SpikingLab\\_modelling\\_agents\\_controlled\\_by\\_Spiking\\_Neural\\_Networks\\_in\\_Netlogo](https://www.researchgate.net/publication/303846142_SpikingLab_modelling_agents_controlled_by_Spiking_Neural_Networks_in_Netlogo)
- [21] Jones, J., Flynn, A. (1993). Chapter 9, Robot Programming (Subsumption architecture) in *Mobile Robots*, A. K. Peters, Ltd.
- [22] Lazzeri, N., Mazzei, D., Cominelli, L., Cisternino, A., De Rossi, D. (2018). Designing the Mind of a Social Robot. *Applied Sciences*. Tomo 8, N.º 2: 302. DOI:10.3390/app8020302
- [23] Lorenz, K. (1986). *Biología del Comportamiento - Evolución y modificación de la conducta*. Siglo XXI Editores, México D.F., México.
- [24] Mataric, M. (2007). *The Robotics Primer*. MIT Press. <http://neuron.tuke.sk/sabolpatrik/students/humanoids16/Cvicenia/RoboticsPrimer.PDF>.

- [25] Lee, G. y Chwa, D. (2018). Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance. *Intelligent Service Robotics*, Volume 11, Issue 1, pp 127–138.
- [26] Melidis, C., Iizuka, H. & Marocco, D. (2018). Intuitive control of mobile robots: an architecture for autonomous adaptive dynamic behaviour integration. *Cognitive Processing* 19(2): 245-264. doi: 10.1007/s10339-017-0818-5. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28585090>
- [27] Muñoz, P., Moreno, M., Barrero, D., Roperro, F. (2018). MoBAR: a Hierarchical Action-Oriented Autonomous Control Architecture. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. pp 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0810-z>
- [28] Prescott T., Redgrave P., Gurney K. (1999). Layered Control Architectures in robots and Vertebrates, *Adaptive Behavior*, Vol 7, pp. 99-127. <http://eprints.whiterose.ac.uk/107032/1/Prescott%20Adaptive%20Behavior%201999%20preprint.pdf>.
- [29] Raglin, A., Metu, S., Howard, C. (2018). Understanding theoretical human information interaction, the development of a standard model using an agent based modeling framework, *Proc. SPIE 10653, Next-Generation Analyst VI*, 1065302; doi: 10.1117/12.2304533; <https://doi.org/10.1117/12.2304533>.
- [30] Rodríguez, F., Matellán, V., Conde, M., Martín F. (2018). HiMoP: A three-component architecture to create more human-acceptable social-assistive robots. *Cognitive Processing*, 19 (2): 233-244. <https://doi.org/10.1007/s10339-017-0850-5>.
- [31] Sakellariou, I., Kefalas, P., Tamatopoulou, I. (2008). Teaching Intelligent Agents using NetLogo. *Proceedings of the ACM-IFIP IEEIII 2008 Informatics Education Europe III Conference, Venice, Italy*. <https://pdfs.semanticscholar.org/0d6f/2b8bc1015dda90e0d68939e388e43359d155.pdf>.
- [32] Tisue, S., Wilensky, U. (2004). NetLogo: Design and implementation of a multi-agent modeling environment. *Proceedings of Agent*. <https://ccl.northwestern.edu/papers/2013/netlogo-agent2004c.pdf>.
- [33] Walter, G. (1950). An imitation of life. *Scientific American* 182(5): 42-45. <http://robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs643/papers/walter50imitation.pdf>.

- [34] Tzafestas, S. (2018). Mobile Robot Control and Navigation: A Global Overview. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. Volume 91, Issue 1, pp 35–58. <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0805-9>.
- [35] Vanderelst, D., Winfield, A. (2018). An architecture for ethical robots inspired by the simulation theory of cognition. *Cognitive Systems Research*. Volume 48, Pages 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2017.04.002>.
- [36] Walter, G. (1951). A machine that learns. *Scientific American* 185(2): 60-63. <http://robotics.cs.tamu.edu/dshell/cs643/papers/walter51learns.pdf>.
- [37] Zaharija, G., Grubač, A., Granić, A. (2014). LEARN–LEGO Robot and Netlogo. *Proceedings of CIET 2014*, pp. 209-218. University of Split. [https://www.researchgate.net/publication/273086230\\_LEARN\\_\\_LEGO\\_Robot\\_and\\_Netlogo](https://www.researchgate.net/publication/273086230_LEARN__LEGO_Robot_and_Netlogo).

# **ANÁLISIS DE LA CONCEPTUALIZACIÓN DE LA INTEGRAL DEFINIDA POR MEDIO DE LA TEORÍA APOE**

*ANALYSIS OF THE CONCEPTUALIZATION OF THE INTEGRAL DEFINED THROUGH THE APOE THEORY*

**Martha Patricia Jiménez Villanueva**

Instituto Politécnico Nacional  
*mpjvillanueva1972@gmail.com*

**Elena Fabiola Ruiz Ledesma**

Instituto Politécnico Nacional  
*efruiz@ipn.mx*

**Ángel Salvador Montiel Sánchez**

Instituto Politécnico Nacional  
*chavamontiel@hotmail.com*

## **Resumen**

El estudio que se reporta toma como referencia el análisis de las construcciones mentales que se ponen en juego al abordar el concepto de integral definida, las cuales son: Acciones, Procesos y Objetos. Con base en la información obtenida se diseñaron tareas de acuerdo a su nivel cognitivo para propiciar una evolución en el desarrollo de su conocimiento del concepto en estudio. Se trabajó con una muestra de 14 estudiantes de nivel superior, quienes resolvieron un cuestionario relacionado con la integral definida. Los resultados señalan que los estudiantes se encuentran en diferentes etapas de construcción del concepto, ya que el 78% mostró evidencia de una concepción Acción al tener que realizar cada uno de los pasos en la resolución de los problemas propuestos, el 35% parece haber ido un poco más allá, en el sentido de que mostró evidencia del trabajo con objetos genéricos y el 7% parece haber encapsulado el conocimiento, ya que fue capaz de identificar las características para que una función sea integrable y de construir nuevas integrales. Por ello, se diseñaron tareas de acuerdo a la etapa de construcción en la que se encuentran.

**Palabras Claves:** Diseño de tareas, etapas de la teoría APOE, integral definida

## **Abstract**

*The study that is reported takes as reference the analysis of the mental constructions that are put into play when approaching the concept of definite integral, which are: Actions, Processes and Objects. Based on the information obtained, tasks were designed according to their cognitive level to promote an evolution in the development of their knowledge of the concept under study. We worked with a sample of 14 higher level students, who resolved a questionnaire related to the defined integral. The results indicate that the students are in different stages of construction of the concept, since 78% showed evidence of a conception Action having to perform each of the steps in the resolution of the proposed problems, 35% seems to have gone a little further, in the sense that it showed evidence of work with generic objects and 7% seems to have encapsulated knowledge, since it was able to identify the characteristics for a function to be integrable and to build new integrals. Therefore, tasks were designed according to the construction stage in which they are located.*

**Keywords:** *Definite integral, design of tasks, stages of APOE theory.*

## **1. Introducción**

Diversas investigaciones que se han realizado sobre problemas del aprendizaje del Cálculo Diferencial e Integral de funciones reales [Orton, 1983], [Bezuidenhout, 2000], [Muñoz, 2000], coinciden en que la mayor parte de ellos tienen su origen, en primera instancia, en una incompreensión de los conceptos básicos y fundamentales del cálculo, por lo que uno de los retos que enfrentan los profesores en las aulas, consiste en recuperar el significado de los conceptos que están inmersos en el Cálculo, utilizando la capacidad numérica, gráfica y simbólica que el medio computacional ofrece en la actualidad.

Las dificultades que presentan los estudiantes de ingeniería en la comprensión de la integral definida han motivado el desarrollo de investigaciones que intentan explicar las razones de tales dificultades desde diferentes enfoques: teoría de las representaciones [Narro, 2011], teoría APOE, [Boigues, 2009], [Jiménez, 2017], teoría de Campos Conceptuales [Muñoz, 2000].

Desde la perspectiva de las representaciones, con el objetivo de indagar si los estudiantes de diferentes ramas de ingeniería logran la aprehensión conceptual de la integral definida y la aplican a la resolución de problemas, [Narro, 2011] realizó un estudio con 176 estudiantes de ocho especialidades de ingeniería. Ella concluyó que el aprendizaje logrado consiste en acercamientos a la aprehensión de alguna representación semiótica, principalmente la algebraica (pueden proceder algorítmicamente aplicando reglas y algoritmos) y en menor proporción la geométrica; que no han reflexionado sobre la interpretación del concepto ni logran aplicarlo a la resolución de problemas.

Desde el enfoque de la teoría APOE (por ser las siglas de las construcciones mentales que se ponen en juego al abordar cualquier concepto matemático y que son estudiadas por esta teoría: Acciones, Procesos, Objetos y Esquemas), algunos investigadores plantean la necesidad de relacionar la sucesión de sumas de Riemann con su dependencia del valor  $n$  de la partición, como una manifestación de la relación entre la sucesión de sumas de Riemann y el paso al límite que configura el significado de la integral definida [Boigues, 2009].

Desde la teoría de Campos Conceptuales se plantea la problemática de la enseñanza del Cálculo Integral como un desequilibrio entre lo conceptual y lo algorítmico, en el sentido de que se enseñan procedimientos para calcular integrales mediante los métodos de integración y hasta que se abordan las *aplicaciones* es cuando se estudian aspectos relacionados con la integral [Muñoz, 2000].

En el presente documento se reporta un estudio realizado sobre el concepto de integral definida, el cual tiene como finalidad mostrar las etapas cognitivas de acuerdo con la teoría denominada APOE en la que se encuentran los estudiantes en relación con dicho concepto.

### **Problemática de investigación y su justificación**

Generalmente los grupos de Cálculo de primer semestre están conformados por estudiantes que cursaron el nivel medio superior en bachilleratos generales o en áreas específicas (fisicomatemáticas, administrativa, biológica). Esto conduce a la

formación de grupos que incluyen estudiantes que han tenido o no un primer acercamiento a los conceptos propios del cálculo, como derivación e integración y, dentro de los que ya han tenido una primera aproximación a los conceptos, se pueden identificar estudiantes con diferentes niveles de comprensión. El que no todos los estudiantes hayan construido algunos conceptos que son fundamentales para construir nuevos conceptos al abordar los temas de las distintas asignaturas que llevarán a lo largo de su carrera, provoca en el estudiante situaciones adversas durante su trayectoria académica, convirtiéndose en un problema que debe ser resuelto entre el maestro y el estudiante, que en la mayoría de los casos recae la solución sólo en el estudiante, quien busca alternativas que lo ayuden a resolver la serie de situaciones desencadenadas por las deficiencias conceptuales con las que ingresó al nivel superior. Esta problemática motivó a desarrollar esta investigación, la cual se limitó a trabajar con uno de los conceptos fundamentales en Cálculo, que es el de la integral definida.

### **Objetivo de la investigación**

Identificar las etapas en las que se encuentran los estudiantes de acuerdo a la teoría APOE, mediante la resolución de actividades sobre la integral definida, para proponer tareas que involucren a este concepto y, que vayan acordes a la etapa en la que se encuentre el estudiante.

### **Referentes teóricos**

La teoría APOE se basa en la idea de Abstracción Reflexiva<sup>1</sup> de Piaget y ha sido reconstruida para el desarrollo de nociones matemáticas más avanzadas. Esta teoría proporciona un ciclo de investigación, que integra tres componentes:

- Análisis teórico.
- Diseño e implementación de enseñanza.

---

<sup>1</sup> La abstracción reflexiva consiste de dos partes. La primera parte, involucra la reflexión en dos sentidos: el primero en el sentido de tomar conciencia de los contenidos y las operaciones sobre esos contenidos, el segundo, en el sentido de reflejar el contenido y las operaciones desde un nivel o estado cognitivo más bajo a un nivel más alto (es decir, desde procesos a objetos). La segunda parte, consiste en la reconstrucción y la reorganización de los contenidos y las operaciones en esta etapa superior, donde resulta que las operaciones mismas se convierten en contenidos a los cuales se pueden aplicar nuevas operaciones (Piaget y García, 1973, citado en Arnon, et al. 2014, p.6).



- Observación, análisis y verificación de datos.

El propósito del análisis teórico de un concepto es proponer modelos que pueden desarrollarse en la mente de un individuo cuando está tratando de aprender un concepto matemático. Este modelo es conocido dentro de esta teoría como *descomposición genética preliminar* del concepto, el cual es un conjunto estructurado de construcciones mentales que pueden describir cómo el concepto puede desarrollarse en la mente de un individuo [Arnon, 2014].

### **Estructuras y mecanismos mentales**

Desde el punto de vista de la teoría APOE los individuos dan sentido a los conceptos matemáticos mediante la construcción y el uso de estructuras (o construcciones) mentales denominadas Acciones, Procesos, Objetos y Esquemas, llamadas etapas en la construcción de un concepto. Esas estructuras surgen como resultados de mecanismos mentales como la interiorización, encapsulación, coordinación, reversión, desencapsulación y tematización.

Posteriormente, esta primera descomposición se usa como base teórica para diseñar materiales que se utilizan en el salón de clase, así como instrumentos de investigación que se pueden utilizar en la enseñanza y aprendizaje de dicho concepto. Con base en los resultados del conocimiento de los individuos antes y después de la enseñanza y el aprendizaje de dicho concepto, se refina la descomposición genética para que sea más congruente con la forma en que realmente aprenden los individuos. Este procedimiento se repite, en principio, todas las veces que sea necesario, hasta que se considere que la descomposición propuesta permite tanto enseñar de manera efectiva como explicar las construcciones mentales de los individuos cuando están aprendiendo un concepto determinado [Trigueros, 2005].

En una descomposición genética se destacan las construcciones mentales, la relación entre ellas y los mecanismos mentales que un individuo podría realizar en la comprensión de un concepto. Una construcción de **Acción** es una transformación que ocurre como una reacción a estímulos que el individuo percibe esencialmente

como externos (una fórmula, un algoritmo, un conjunto de reglas). Una construcción de **Proceso** es una transformación que ocurre como resultado de una reflexión propiciada por la repetición consciente de acciones que conduce al individuo a pensar en cómo llevar a cabo el mismo tipo de acción, sin la necesidad de estímulos externos, además de describir los pasos involucrados en la transformación e incluso invertirlos teniendo de esta manera más control de la misma [Dubinsky, 2001], [Trigueros, 2005]. Un Proceso puede ser resultado de la interiorización de una Acción, pero también puede generarse por la coordinación de dos o más Procesos; este mecanismo permite establecer relaciones entre los Procesos para determinar nuevos Procesos (mediante el uso de operaciones aritméticas “+”, “-”, “\*”, “/”, conectores lógicos “^”, “v” entre otros). Una construcción de **Objeto** se logra mediante el mecanismo de encapsulación, que consiste básicamente en la conversión de una estructura dinámica (un Proceso) en una estructura estática (un Objeto), la cual se genera cuando el individuo tiene la necesidad de transformar un Objeto para resolver una situación [Arnon, 2014].

La realización de las construcciones mentales sobre un tópico determinado conduce al individuo al desarrollo de *concepciones*<sup>2</sup>: un individuo con una *concepción Acción* del nuevo concepto requiere de información que le indique paso a paso cómo realizar la transformación, donde cada paso de la transformación necesita ser realizado. Un individuo con una *concepción Proceso* del concepto tiene la habilidad para imaginar que se han realizado todos los pasos de la transformación sin necesidad de haber ejecutado cada uno de ellos de manera explícita y es capaz de saltarse pasos e incluso invertirlos. Un individuo con una *concepción Objeto* del concepto concibe un Proceso como un todo y es capaz de actuar sobre él y, realiza y construye transformaciones sobre su totalidad [Arnon, 2014].

En esta teoría se describe un **esquema** de un individuo, para un tópico matemático, como un conjunto coherente de Acciones, Procesos, Objetos y otros Esquemas

---

<sup>2</sup> McDonald et al. (2000) hacen una distinción entre concepción y concepto, el primero es intrapersonal (las ideas o la comprensión del individuo) y la segunda es comunal (acordado por los matemáticos). En la teoría APOE, una concepción se desarrolla como un resultado de la actividad reflexiva y el concepto se refiere a la comprensión colectiva de ese contenido por la comunidad de matemáticas. (citado en Arnon, et al., 2014, p. 18)

previamente contruidos, al que se recurre para tratar con una situación matemática nueva. El término *coherente* se usa en el sentido que éste da, explícita o implícitamente, un medio para determinar cuál fenómeno está en el ámbito del Esquema y cuál no [Dubinsky, 2001].

Cuando un individuo se enfrenta a una situación matemática específica, evoca un Esquema para resolverla y pone en juego aquellos conceptos que están disponibles para él en ese momento, así como el tipo de construcciones que posee del concepto (Acciones, Proceso y Objetos) y utiliza relaciones entre esos elementos. Al respecto [Trigueros, 2005] afirma que:

*“Ante una misma situación, diferentes estudiantes pueden utilizar los mismos conceptos y diferentes relaciones lógicas entre estos conceptos. El tipo de relaciones lógicas que cada sujeto establece entre los elementos que utiliza, así como el tipo de construcciones que hace sobre el concepto matemático, depende del conocimiento matemático que tenga. Se espera que a mayor conocimiento se hayan construido más relaciones y que estas relaciones formen estructuras cognitivas coherentes en el sentido de que el individuo distinga claramente aquellas situaciones que pueden tratarse poniendo en juego un esquema específico y aquellas para las que no es adecuado” [p. 11].*

Así, cuando los estudiantes resuelven un mismo problema, es posible identificar, en las Acciones que realizan, Esquemas en distintos grados de formación o estructuración dependiendo del tipo de relaciones que pueden manifestarse como construidas. En la figura 1 se esquematiza la relación entre las estructuras y los mecanismos mentales para construcción de conceptos matemáticos.

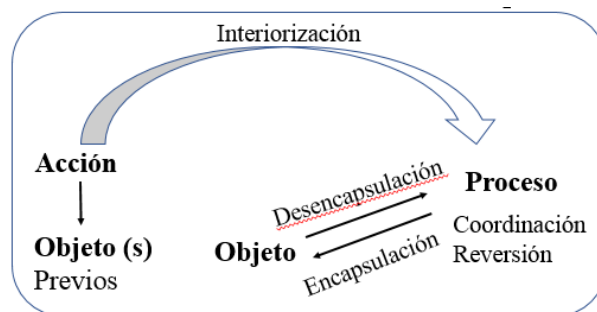


Figura 1 Estructuras y mecanismos mentales para la construcción de conceptos matemáticos [Arnon, 2014].

## 2. Métodos

El estudio se realizó en tres etapas (figura 2), en la primera etapa denominada **diseño**, se seleccionó la muestra de estudiantes con los que se trabajaría y se diseñó el cuestionario, con la finalidad de identificar los conocimientos que tenían los estudiantes con relación al concepto de integral definida.

En la etapa 2 denominada **ejecución**, se aplicó el cuestionario a la muestra de estudiantes, se efectuó una revisión general de las respuestas dadas por los estudiantes, se determinaron categorías y de acuerdo a ellas es como se clasificaron las respuestas de los participantes.

En la etapa 3, llamada **evaluación**, se organizaron las respuestas de acuerdo a las etapas de la teoría APOE.

Con la información obtenida se diseñaron actividades que van acorde a los niveles en los que se encuentran los estudiantes de acuerdo a la teoría APOE.



Figura 2 Etapas del método empleado en la investigación.

### Etapa 1. Diseño

#### Descripción de la muestra

Inicialmente se contempló un grupo formado por 30 estudiantes que se encontraban cursando la asignatura de Cálculo en su primer semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales. El día en que se aplicó el cuestionario varios estudiantes llegaron después de iniciado la aplicación del cuestionario, por lo que ya no participaron y sólo estuvieron presentes desde el inicio de la sesión

14 de los estudiantes del grupo, por lo que sólo se contempló a esta cantidad de estudiantes para la investigación. Los participantes proceden de diferentes áreas del nivel medio superior: fisicomatemática, contador-administrativo y bachillerato general. La edad de los estudiantes está entre 18 y 19 años.

### Cuestionario diagnóstico

El cuestionario diagnóstico sobre la integral definida está conformado por 7 ítems, que toman en cuenta las diferentes etapas de la construcción del conocimiento, de acuerdo a la teoría APOE. Las cuestiones abordadas se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Cuestionario diagnóstico de integral definida.

Reactivos	
1	¿Cómo le explicarías a un compañero el significado de $\int_a^b f(x)dx$ ? Describe y da un ejemplo.
2	¿Cómo le explicarías a un compañero el significado de $F(x) = \int_a^x f(t)dt$ ? Describe y da un ejemplo.
3	Evaluar la integral definida $\int_{-2}^3 (x + 2) dx$ usando: a) La definición de límite. b) Una interpretación geométrica. c) Reglas de integración.
4	$\int_{-1}^1 f(x)dx = 0$ y $\int_0^1 f(x) dx = 5$ Hallar: a) $\int_{-1}^0 f(x)dx$ b) $\int_0^1 f(x)dx - \int_{-1}^0 f(x)dx$ c) $\int_{-1}^1 3f(x)dx$ d) $\int_0^1 3f(x)dx$
5	Determina si la función $f(x) = \frac{1}{x-4}$ es integrable en el intervalo $[3,5]$ . Escribe una breve explicación
6	Proporciona un ejemplo (si es posible) de una función que sea integrable en el intervalo $[-1,1]$ , pero no continua en $[-1,1]$
7	Escribe la expresión $\lim_{n \rightarrow +\infty} \sum_{i=1}^n \frac{8i^2}{n^3}$ como una integral definida $\int_a^b f(x)dx$ .

Después de la aplicación del cuestionario, se revisaron las respuestas dadas por los estudiantes y se clasificaron en categorías. Con esta información se hizo la categorización de acuerdo con las etapas de comprensión del concepto de integral

definida que plantea la teoría APOE. Estas acciones corresponden a la Etapa 3 del método de investigación, así como a la parte de resultados del presente documento.

### 3. Resultados

En este apartado del documento se contempla lo correspondiente a la etapa 3 del método de investigación empleado.

#### Etapa 3. Evaluación

Primero se proporcionan los resultados obtenidos del cuestionario diagnóstico, usando para ello una tabla por cada pregunta del cuestionario. Las respuestas dadas a las preguntas abiertas fueron clasificadas en categorías, de acuerdo a lo expresado por los estudiantes, anotándose la frecuencia de aparición de las mismas expresadas como porcentajes, con la finalidad de hacer un conteo y mostrar los resultados de forma cuantitativa y su correspondiente análisis cualitativo.

En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en la pregunta 1, que dice: ¿Cómo le explicarías a un compañero el significado de  $\int_a^b f(x)dx$ ? Describe y da un ejemplo. Las categorías asociadas a la primera pregunta fueron: Concepción que tienen los estudiantes de la integral definida, considerándose 4 opciones, las cuales fueron: como un área, como el proceso inverso de la derivada, como una suma infinita y otra, que no guarda relación con la integral. La segunda categoría fue la ejemplificación de una integral definida, empleando para ello: Una expresión específica de una función, una función genérica y no ejemplaron.

Tabla 2 Resultados de la pregunta 1.

Categorías	Función específica	Función genérica	No ejemplifican
Concepción de integral definida/Ejemplificación			
Es un área	35.7%	21.4%	14.3%
Es el proceso inverso de la derivada	21.4%	14.3%	0
Es una suma infinita	0	7.1%	0
Otra-sin relación con la integral	0	0	7.1%
Total	57.1%	42.8%	21.4%

La concepción de integral definida que tiene el 57% de la muestra de estudiantes es el de área y de este porcentaje el 35% empleó una función específica para ejemplificar, el otro 21 % se encuentra en una etapa de generalización.

En la tabla 3 se presentan los resultados del reactivo 3. En éste se solicita a los estudiantes calcular una integral de una función específica, en particular una función lineal, en un intervalo usando diferentes acercamientos, la integral como un límite, la integral como un área (representación geométrica) y mediante las reglas de integración.

Tabla 3 Resultados del reactivo 3

Categorías	Usando la definición de límite	Representación geométrica	Regla de Barrow
Identifica y resuelve correctamente	7.1%	35.7%	71.4%
Identifica y no resuelve correctamente	21.4%	7.1%	21.4%
Identifica y no resuelve	0%	50%	0%
No identifica la representación	7.1%	0%	0%
No responde	64.3%	7.1%	7.1%

En la tabla 3 se observa que 71% de los estudiantes resolvió la integral definida empleando la regla de Barrow, lo que implica que estos estudiantes trabajan mejor usando técnicas de integración que a través de otra representación. En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos del reactivo 4. En éste se proporciona el valor de dos integrales, a saber,  $\int_{-1}^1 f(x)dx = 0$  y  $\int_0^1 f(x) dx = 5$ , con base en estos valores se solicita al estudiante determinar el valor de otras integrales.

Tabla 4 Resultados del reactivo 4

	Correctas	Incorrectas	No responde
$\int_{-1}^0 f(x)dx$	64.3%	14.3%	21.4%
$\int_0^1 f(x)dx - \int_{-1}^0 f(x)dx$	35.7%	35.7%	28.6%
$\int_{-1}^1 3f(x)dx$	71.4%	0%	28.6%
$\int_0^1 3f(x)dx$	71.4%	0%	28.6%

De acuerdo con los resultados arrojados en el reactivo 4, entre el 35% y el 71% de los estudiantes muestra evidencia que puede operar con objetos genéricos.

En la tabla 5 se presentan los resultados obtenidos del reactivo 5. En el que se solicitaba valorar la integrabilidad de una función en un intervalo dado.

Tabla 5 Resultados del reactivo 5.

Categorías	No es integrable	Si es integrable	No responden	Total
Reconocimiento de un punto de discontinuidad de la función	14.3%	0%	0%	14.3%
Reconocimiento de una asíntota vertical de la función	14.3%	0%	0%	14.3%
Uso de la regla de Barrow correctamente. No hay logaritmos de valores negativos	14.3%	0%	0%	14.3%
No hay un área encerrada	7.2%	0%	0%	7.2%
Uso de la regla de Barrow de forma incorrecta	0%	14.3%	0%	14.3%
No justifica	0%	7.2%	28.4%	28.4%
Total	50.1%	21.5%	28.4%	100.0%

En el reactivo 5, el 28% no responde, el 21% indica que la función si es integrable y el 50% de los estudiantes señala que la función no es integrable, en sus argumentaciones manifiestan que la función tiene una discontinuidad infinita, una asíntota o no hay un área encerrada o limitada.

Las tablas de los reactivos 6 y 7 no se agregan debido a que no es posible hacer una clasificación de las respuestas porque un alto porcentaje de estudiantes no respondió. De acuerdo con los resultados mostrados en las tablas 3 a la 6, se realizó una clasificación con base en las etapas de la teoría APOE (Acciones, Procesos, Objetos). En la segunda columna de la tabla 6 se presentan los indicadores correspondientes a cada una de las etapas, estos indicadores no son excluyentes, por lo que hay estudiantes que pueden estar en dos o más de ellos. En la última columna se encuentran los porcentajes de los estudiantes que se han clasificado de acuerdo a los indicadores representativos de los distintos niveles de la teoría APOE.

Con base en la categorización llevada a cabo de los resultados obtenidos, se diseñaron tareas de acuerdo a las etapas que plantea la teoría APOE con la



intención de que los estudiantes puedan ir avanzando en el desarrollo de su conocimiento.

Tabla 6 Clasificación de los estudiantes de acuerdo a las etapas de la teoría APOE.

Etapas de la Teoría APOE	Indicadores	Porcentaje de estudiantes
Acciones	Recordar fórmulas	71.4%
	Explicación de la integral usando valores específicos	35.7%
	Uso de los distintos registros (algebraico y gráfico) para mostrar casos específicos	42.8%
Etapas de la Teoría APOE	Indicadores	Porcentaje de estudiantes
	Cálculo de la integral definida usando valores específicos.	71.4%
Etapas de la Teoría APOE	Indicadores	Porcentaje de estudiantes
Procesos	Explicación de la integral usando valores genéricos	42.8%
	Uso de los distintos registros (numérico, algebraico y gráfico) para generalizar.	42.8%
	Cálculo de integrales mediante la regla de Barrow usando elementos genéricos.	71.4%
Objeto	Hablar de las características del objeto	7.1%
	Construir nuevas integrales	7.1%

### **Propuesta de tareas acorde a las etapas de la teoría APOE**

En la tabla 7 se presentan ejemplos de tareas de acuerdo a las etapas de la teoría APOE.

En la primera tarea se requiere del trabajo con objetos concretos, una expresión de una función específica, un intervalo dado y un número fijo de subintervalos. Este tipo de tareas se deben presentar a estudiantes que no han tenido un primer acercamiento al concepto y aquellos que muestran una concepción Acción del concepto de integral definida.

En la segunda tarea se plantea el trabajo con objetos genéricos, cualquier función, cualquier intervalo, con diferente número de subintervalos. Este tipo de tareas puede presentarse a estudiantes que muestren evidencia de haber interiorizado el trabajo con objetos específicos y que pueden imaginar el trabajo con objetos

genéricos. En la tercera tarea se requiere pensar en el proceso como un todo para identificar sus características y poder operar con él. Este tipo de situaciones pueden presentarse a estudiantes que muestran evidencia de haber encapsulado el proceso en un objeto.

Tabla 7 Diseño de tareas.

Etapa Teoría APOE	Tareas
Acción	Calcular la suma de Riemann inferior de las funciones , en el intervalo $(I)$ indicado y el número de rectángulos $(n)$ dado. Escribe una explicación de cuándo la suma inferior es positiva y cuándo es negativa.
Proceso	Escribe una expresión para determinar una suma de Riemann inferior de una función $f$ , en un intervalo $I$ , con $n$ subintervalos. Explica qué ocurre a medida que aumenta el número de subintervalos.
Objeto	Propón dos funciones discontinuas en un intervalo cerrado con las cuales es posible calcular una suma de Riemann inferior para cualquier partición de ese intervalo y dos con las cuales no es posible. a) ¿Qué característica tienen en común las dos funciones con las cuales es posible calcular una suma de Riemann inferior para cualquier partición? b) ¿Qué característica tienen en común las dos funciones con las cuales no es posible calcular una suma de Riemann inferior para cualquier partición? c) Escribe una partición de un intervalo cerrado para la cual no es posible calcular una suma de Riemann inferior para los otros dos ejemplos, muestra la gráfica de los rectángulos y justifica tu respuesta.

#### 4. Discusión

En este apartado se realiza un análisis de carácter cualitativo de las respuestas del cuestionario para profundizar en los procesos cognitivos de los estudiantes en relación con las etapas de la construcción del concepto de integral definida, de acuerdo a la teoría APOE.

Con relación a la pregunta 1, se identificaron tres ideas que los estudiantes tienen de la noción de integral definida: como área, como un proceso inverso de la derivada y como una suma infinita. Además, se detectó el trabajo con objetos específicos o genéricos. De acuerdo con las respuestas de los estudiantes se obtuvo que la idea de integral definida que predomina es la de área, seguida de la idea de integral definida como el proceso inverso de la derivada. Ambas son

ejemplificadas preferentemente usando una función específica. También se observa que sólo un estudiante de los 14 hizo referencia a una suma de diferenciales.

Respecto a la pregunta 2, el 14% de los estudiantes participantes establecieron una diferencia entre la integral definida (un número) y la integral indefinida (una función). El resto de los estudiantes sólo realizó un parafraseo de la explicación dada en la pregunta 1.

Con relación al reactivo 3, un elevado porcentaje de los estudiantes participantes identificó que hay diferentes representaciones de la integral definida pero no lograron hacer un uso correcto de dos de las representaciones (idea de límite y representación geométrica). A diferencia de la representación algebraica mediante reglas de integración, donde un alto porcentaje de estudiantes (71%) respondió correctamente.

En el reactivo 4 el 64% de la muestra de estudiantes logró resolver correctamente la primera integral, siendo que se proporcionaba una integral expresando al integrando de forma general ( $f(x)$ ), pero en las tres siguientes integrales, menos de la mitad de los alumnos lograron resolverla correctamente, por lo que se puede decir que tienen una concepción Acción al no poder manipular las integrales expresadas en su forma general. No ha llegado al trabajo de forma genérica que requiere una concepción Proceso y Objeto.

En el reactivo 5, la mitad de los estudiantes de la muestra se da cuenta que la integral propuesta no es integrable, pese a que sólo el 14% usa la regla de Barrow de forma correcta, los otros estudiantes reconocen que hay una discontinuidad en un punto del intervalo dado, pero no hay un progreso en su razonamiento por lo que sólo atribuir la no integrabilidad de una función a ese criterio, no es suficiente, pues no en todos los casos se cumple. Con relación a este reactivo, se puede decir que solo el 14% se ubica en una concepción Objeto al reconocer las propiedades de una función que se puede integrar, mientras que el 28% se encuentra en una concepción proceso ya que muestran algunos indicios de las propiedades y el resto de los estudiantes se considera que tienen una concepción Acción del concepto de integral definida.

Respecto a los reactivos 6 y 7 un alto porcentaje (78%) de estudiantes no respondió, solo un estudiante proporcionó una función definida por partes en un intervalo cerrado con una discontinuidad de salto y ninguno logró relacionar los elementos involucrados en una integral definida con los que aparecen en una suma de Riemann.

## **5. Conclusiones**

La integral definida es un concepto fundamental en los cursos de cálculo de las carreras de ingeniería, sin embargo, el aprendizaje de este concepto se ha caracterizado por la memorización de fórmulas y el uso de reglas que el estudiante repite sin una comprensión real del concepto, por tanto, el estudiante no es capaz de reconocer situaciones problema relacionadas con la integral definida y mucho menos enfrentarlas con éxito.

Los estudiantes que ingresan a la universidad se encuentran en diferentes etapas de construcción del concepto de integral definida asociadas principalmente al estudio del concepto como área mediante la aplicación de la regla de Barrow, pero con una baja, incluso nula, comprensión del concepto como el límite de una suma de cantidades formadas multiplicativamente (suma de Riemann).

Al considerar los 7 reactivos que conformaron el cuestionario, se considera que los estudiantes que ingresan a un primer curso de Cálculo en el nivel superior tienen diferentes etapas de construcción del concepto de integral definida ya que en la muestra de estudiantes con los que se trabajó, 78% presenta evidencia de una concepción Acción, el 35% parece haber ido un poco más allá de una concepción Acción en el sentido de que aborda el trabajo con objetos genéricos y el 7% parece estar en el nivel de Objeto en la construcción del concepto de integral definida ya que es capaz de identificar las características para que una función sea integrable así como dar ejemplos genéricos de integrales y construir nuevas integrales.

No es suficiente únicamente diseñar una lista de ejercicios para que los estudiantes realicen extra-clase, es necesario hacer una clasificación de cuáles debe hacer el estudiante de acuerdo con la etapa de construcción en la que se encuentren con el objetivo de ir avanzando en el desarrollo de su conocimiento.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Arnon, I., Cottril, J., Dubinsky, E., Oktac, A., Roa-Fuentes, S., Trigueros, M., & Weller, K. (2014). *APOS Theory A Framework for Research and Curriculum Development in Mathematics Education*. New York Heidelberg Dordrecht London: Springer.
- [2] Bezuidenhout, J., & Olivier, A. (2000). Student's conceptions of the integral. *Proceedings of the 24th Conference of International Group of the Psychology of Mathematics Education*, 2, 73-80.
- [3] Boigues, F. J., Llinares, S., & Estruch, V. D. (2010). Desarrollo de un esquema de la integral definida en estudiantes de ingeniería relacionadas con las ciencias de la naturaleza: Un análisis a través de la lógica Fuzzy. *Revista Latinoamericana de Investigación en Matemática Educativa*, 13(3), 255-282.
- [4] Cuevas, A. & Pluvineau, F. (2013) Investigaciones Sobre la Enseñanza del Cálculo. *El Cálculo y su Enseñanza*, 4(1), 57-82.
- [5] Dubinsky, E., & McDonald, M. A. (2001). APOS: A Constructivist Theory of Learning in Undergraduate Mathematics Education Research. In D. Holton (Ed.), *teaching and Learning of Mathematics at University Level. An ICMI Study*. 7 (pp. 273-280). Dordrecht: Kluwer Academia Publisher.
- [6] Jiménez-Villanueva, M. P. (2017). Estudio de la integral definida: un acercamiento a través de la función de acumulación. (Tesis de doctorado). CINVESTAV-IPN, México.
- [7] Muñoz, G. (2000, julio). Elementos de enlace entre lo conceptual y lo algorítmico en el cálculo. *Relime*, 3 (2), 131-170.
- [8] Narro, R. P. (2011). Aprendizaje de la Integral Definida en estudiantes de ingeniería. *El cálculo y su enseñanza*, 3, 32-43.
- [9] Orton, A. (1983). Students' understanding of integration. *Educational Studies in Mathematics*, 14, 1-18.
- [10] Trigueros, M. (2005). La noción de esquema en la investigación en matemática educativa a nivel superior. *Education Mathematica*, 17 (001), 5-31.

# **CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO UTILIZANDO INTERPOLACIÓN LINEAL PARA AUTONIVELAR LA SUPERFICIE DE TRABAJO EN UNA CNC**

*COMPUTERIZED NUMERICAL CONTROL USING LINEAR  
INTERPOLATION TO SELF-LEVEL THE WORKING SURFACE IN A  
CNC*

***Miguel Antonio Lázaro Santiago***

Universidad Autónoma del Carmen  
*miguel\_antonio98@hotmail.com*

***David Inocente Santiago Casanova***

Universidad Autónoma del Carmen

***José Luis Vázquez Ávila***

Universidad Autónoma del Carmen  
*jvazquez@pampano.unacar.mx*

***Walter Ariel Silva Martínez***

Universidad Autónoma del Carmen

***Marco Antonio Rodríguez Blanco***

Universidad Autónoma del Carmen

***Horacio Alvarado Vigil***

Universidad Autónoma del Carmen

***Homero Toral Cruz***

Universidad de Quintana Roo  
*htoral@uqroo.edu.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta la implementación de una máquina CNC (Control Numérico Computarizado, por sus siglas en español) de bajo costo que utiliza un algoritmo de autonivelación para mejorar el desempeño del maquinado. Mediante el algoritmo se puede corregir por software el desnivel de la cama de fresado independientemente de las imperfecciones del material que se va a maquinar. Básicamente lo que hace el software es deformar el dibujo que se imprimirá de tal

manera que este compense la deformación del material. Se utiliza una tarjeta de desarrollo "Arduino UNO" para capturar los datos de una sonda de contacto, posteriormente la información obtenida será procesada por una computadora, que a su vez enviará los datos procesados al Arduino para que este accione los motores. Se utilizó NetBeans para el desarrollo de la plataforma del usuario y el firmware GRBL (para Arduino) como lenguaje de programación, ambos de código libre, además el software Matlab es utilizado para realizar las simulaciones del código. Los resultados muestran que el uso del algoritmo de autonivelación efectivamente mejora el proceso de maquinado.

**Palabras Claves:** Auto nivelación, Arduino, CNC, deformación, GRBL, interpolación lineal.

## **Abstract**

*This paper presents the implementation of a CNC machine (Computerized Numerical Control, for its acronym in Spanish) of low cost that uses a self-leveling algorithm to improve the machining performance. By means of the algorithm, the unevenness of the milling bed can be corrected, by software, independently of the imperfections of the material to be machined. Basically, what the software does is to deform the drawing that will be printed in such a way that it compensates for the deformation of the material. An "Arduino UNO" board is used to capture the data from a contact probe, then the information obtained will be processed by a computer, which in turn will send the processed data to the Arduino, so that it drives the motors. NetBeans was used for the development of the user platform and the GRBL firmware (for Arduino) as programming language, both of them are free code, in addition the Matlab software is used to perform the code simulations. The results show that the use of the self-leveling algorithm improves the machining process.*

**Keywords:** Arduino, CNC, GRBL, lineal interpolation, self-leveling.

## **1. Introducción**

Uno de los grandes problemas al momento de fresar con una máquina CNC es que la superficie del material o la cama del CNC no son lo suficientemente planas,

por lo tanto, al momento de cortar en estas condiciones perdemos precisión o el producto final tiende a deformarse. Una solución muy común que se le dio a este problema es el de rectificarla con una fresa [Luis, 2015]. En la literatura existen diversos trabajos que abordan este tema, para CNCs de diferentes aplicaciones. En [De Lica, 2009] y [Kaushik, 2012] se usa una técnica de puntos de referencia para el diseño de placas PCB (*printed circuit board*, por sus siglas en inglés) implementadas en CNC. Dicha técnica permite localizar de manera más precisa los CI (circuitos integrados) en la placa. En [De Lica, 2009] se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes para disminuir los desperfectos en la impresión de PCBs para el diseño de circuitos. En [Barahona, 2013] se implementa un sistema de posicionamiento para orientar la impresión en una impresora 3D. Por otro lado, en [Shaowei, 2012] se presenta un método para modelar, identificar y compensar los errores producidos al momento de maquilar con máquinas CNC, mediante un interferómetro láser. En [Altintas, 2012] se presenta un algoritmo, basado en el uso de filtros, para la compensación de los errores de contorno producidos por las vibraciones de la máquina.

En este trabajo se propone un algoritmo que utiliza interpolación lineal para resolver el problema de la deformación de los materiales. El algoritmo permite escanear la deformación de la superficie del material o cama de fresado por medio de una sonda de contacto. En teoría si conocemos la inclinación que hay en diferentes puntos del material, podemos deducir que tanto se tiene que deformar el dibujo para compensar el desnivel. En la siguiente sección se presenta la metodología para llevar a cabo la implementación.

## **2. Métodos**

La figura 1 muestra el diagrama a bloques de las partes del CNC y el orden de los procesos de software.

### **Sistema de sondeo**

El sistema de sondeo se basa en el principio de los sistemas digitales (0 y 1). Para esto se elaboró una sonda de contacto. Se utiliza un PCB en blanco como una



placa conductora a la cual se le solda un cable que va conectado al Arduino, y otro cable que va del Arduino a la broca del enrutador, se utiliza un shield CNC V3 para arduino UNO, como se muestra en las figuras 2 y 3. Ambos funcionarán como un interruptor ya que la unión de estos dos se comportará como se ve en figura 4.

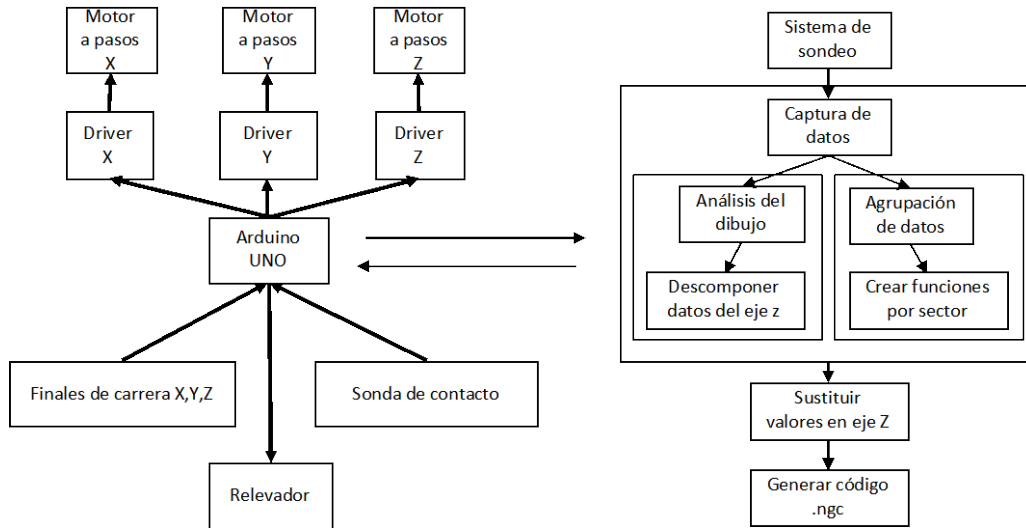


Figura 1 Diagrama de bloques del modelo experimental.

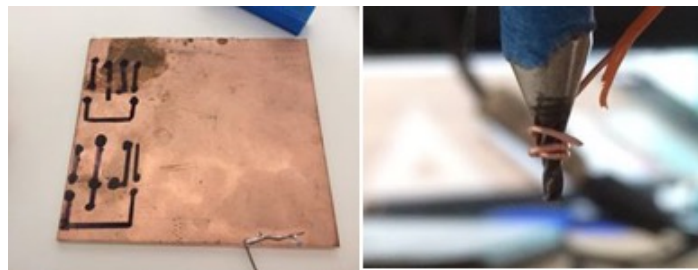


Figura 2 PCB y broca.

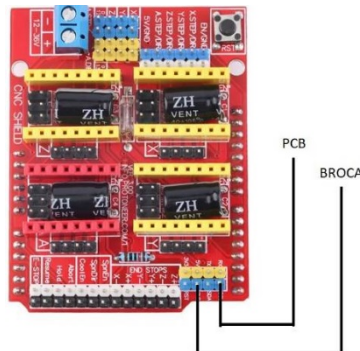


Figura 3 Se usaron los pines SCL Y GND de la shield CNC V3.

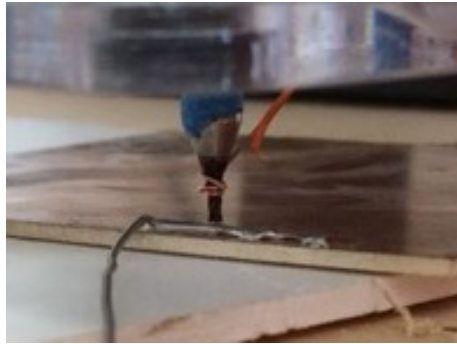


Figura 4 Momento en el que se cierra el circuito.

El funcionamiento de este sistema consiste en establecer las dimensiones del plano en milímetros, este dato es utilizado para limitar el área a escanear (figura 5). Como segundo paso, es necesario colocar puntos de referencia a una distancia específica en cada uno de los ejes (x, y, z.). A esta distancia le llamamos “resolución”. Mientras más grande sea la distancia entre cada punto mayor será el rango de error que tendrá la sonda al momento de escanear, por otro lado, mientras más pequeña sea esta distancia, se tendrá más precisión al momento de capturar los datos, aunque su proceso será más lento.



Figura 5 Establece dimensiones del plano ejemplo 10mmx10mm.

Para elegir la resolución es necesario considerar que tan desnivelado o deformado está el material, mientras más desnivel o curvatura tenga el material se requiera de una resolución más pequeña, es decir que la separación entre cada punto sea más corta. Por otro lado, si el material es plano o tiene una inclinación pequeña se puede optar por utilizar una resolución mayor, es decir que la distancia entre cada punto sea más distante, como se muestra en la figura 6.

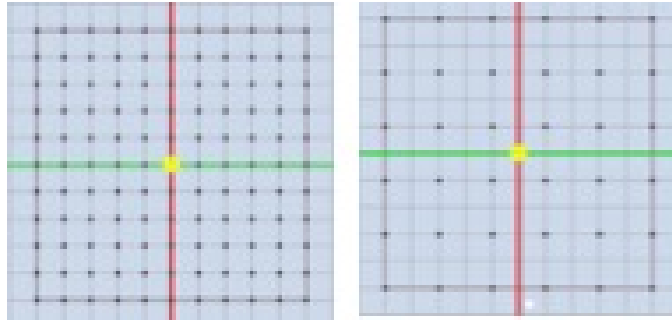


Figura 6 Izquierda con resolución 1 y derecha con resolución 2

### Captura de datos

Este proceso se divide en 2 subrutinas y 4 subprocesos: Se crean 3 matrices de ceros de  $n \times m$ , donde  $n$  es el número de puntos seccionados respecto al eje “X” y  $m$  es el número de puntos seccionados respecto al eje “Y”. Una vez creadas las matrices se realiza el sondeo del material. Este proceso consiste en hacer bajar el eje Z en cada uno de los puntos (guardados en las matrices X y Y) e ir guardando la posición. Cuando la broca (situada en el eje Z) toque la placa conductora se cerrará el circuito indicándole al Arduino que ha llegado al límite por lo tanto la posición Z será guardada en la tercera matriz, como se muestra en la figura 7.

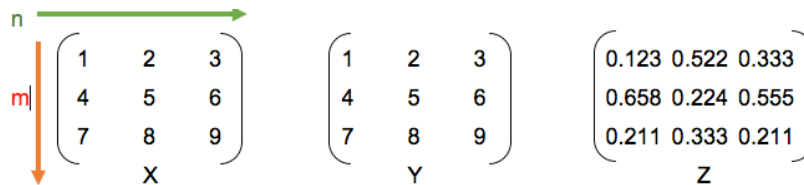


Figura 7 La matriz X y Y muestran las posiciones en las que se obtuvo Z.

### Agrupación de datos

Una vez capturado todos los datos se agrupan los datos de las matrices X y Y en submatrices de  $2 \times 2$ , las cuales son llamadas sectores, figura 8. El número de matrices se puede deducir del producto de  $n-1$  con  $m-1$ .

### Calcular funciones por sector

Para este subproceso se calcula las pendientes de los puntos: AB, AC, CD y DB. Usando la ecuación para la pendiente dados dos puntos,  $m=(y_2-y_1)/(x_2-x_1)$  y la

ecuación de la recta,  $y=mx+b$ . La primer formula (pendiente) sirve para encontrar la ecuación correspondiente al sector que se está analizando. Una vez obtenida todas las ecuaciones de cada función se procede a analizar los datos del dibujo.

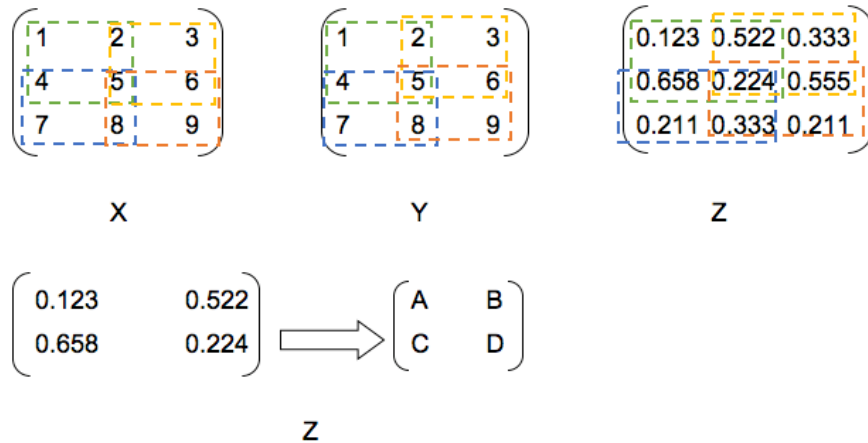


Figura 8 Agrupación de submatrices.

La figura 9 muestra un fragmento de código (grbl) de un dibujo que se usó, dicho fragmento corresponde al corte para un cuadrado de 50x50x3 mm.

T1	
G17	
G21	
G0Z20.0000	Buscando posición inicial del eje Z
G0X0.0000Y0.0000S12000M3	Moviendo ejes a la posición X0,Y0.
G0X25.0000Y25.0000Z5.0000	Origen
G1Z-3.0000F508.0	Corte 1
G1Y75.0000F1270.0	Corte 2
G1X75.0000	Corte 3
G1Y25.0000	Corte 4
G1X25.0000	El eje Z sube
G0Z5.0000	Buscando nueva posición
G0X150.0000Y150.0000Z5.0000	

Figura 9 Fragmento de código grbl para un dibujo a imprimir.

Como se puede observar, siempre que el eje Z se mueve, se marca con la inicial G0Z o G1Z. G0 es un movimiento rápido, mueve la máquina a las coordenadas dadas y G1 es un movimiento lineal, mueve la máquina a las coordenadas dadas,

con la expectativa de que la herramienta esté cortando. Cuando se encuentra en el rango de G1 a G0, la máquina está realizando algún corte, y de G0 a G1, la máquina está localizando, no está cortando. Mientras que “X” y “Y” muestran la posición a la que se tienen que desplazar, por lo que hay que interpolar el eje “Z” entre cada desplazamiento del eje “X” y “Y”. La letra F M3 se utiliza para activar el relevador y por lo tanto el encendido del router y M2 el apagado del router que indica al usuario que se ha terminado el trabajo. Antes de cortar con el CNC el dibujo se capturan previamente los datos del desnivel de la cama de fresado con la sonda con una resolución de 1 muestra por cada 375 mm por lo que resulta una matriz de 3 x 3. La tabla 1 muestra el desarrollo del procedimiento para el ejemplo de la figura 9. Para saber el valor real que tendrá Z, para el primer corte, primero se localiza en que cuadrante esta respecto a X,Y (n,m). De la tabla se observa que el primer corte respecto a ‘Y’ tiene su origen en 25 y finaliza en 75, mientras que el eje ‘X’ se mantiene en 25 ya que se trata de una línea recta. En la tabla de datos capturados por la sonda se busca un sector que esté en el rango de 25-75.

Tabla 1 Datos obtenidos del dibujo.

Datos Cuadrado de 10mm x 10mm x 3mm					
	Origen del corte 1	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4
Eje Z	25	-3	-3	-3	-3
Eje Y	25	75	75	25	25
Eje X	25	25	75	75	25

La tabla 2 muestra los datos capturados por la sonda, estos datos también se muestran en la figura 10. De la figura 10 se observa que el cuadrante abarca desde ‘Y0.0’ (m3, n1) hasta ‘Y375’ (m2, n1), así que se procede a calcular la función de la sonda respecto a Z, esta función corresponde a la ecuación general de la recta para dos puntos. La función resultante se usa para buscar el valor que tendrá ‘Z’ en el origen y el final del corte; al resultado será sumado o restado al valor original del dibujo en Z este proceso se repetirá en cada un de las líneas de código. La idea básica es conectar los 2 puntos dados en X y Y. La función interpolada es una línea recta entre los dos puntos que se interceptarán con el eje Z. El penúltimo proceso

consiste en remplazar los valores de Z por los nuevos valores obtenidos por la interpolación. Para esto se agregaron nuevas líneas de código en el vector. Por cada dirección de X y Y se agregará una nueva dirección en Z. La figura 11 muestra un ejemplo del fragmento de código, esta vez con los nuevos valores de Z.

Tabla 2 Datos capturados por la sonda.

Datos Capturados por la Sonda									
Cuadrante	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
n*m	n1			n2			n3		
m1	0	750	1.7372	375	750	1.3794	750	750	0.4138
m2	0	375	1.9912	375	375	0.9124	750	375	1.0594
m3	0	0	1.8712	375	0	0.9555	750	0	0.9207

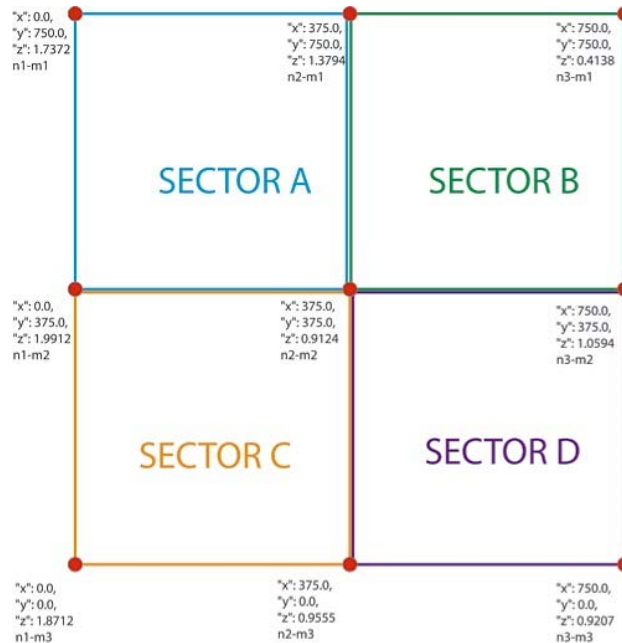


Figura 10 Ejemplo división en sectores para realizar los cortes, respecto a figuras 8 y 9.

Como se puede observar en la figura 11, ahora por cada línea de código o dirección se le anexa el inicio y fin de cada interpolación. Este proceso se hará en todo el dibujo dando como resultado un nuevo dibujo deformado, pero que a su vez encaja casi perfectamente con la deformación del material. Este algoritmo que entra en la categoría plugin se agregó al núcleo del software "Universal G-Code Sender" (UGS) por medio de la plataforma Netbeans [Shapeoko, 2018]. Otras de las modificaciones

que se realizó fue traducir parcialmente el programa, puesto que está en inglés, todo esto con la intención de dar mayor comodidad al usuario final. Una aproximación del algoritmo se presenta en diagrama de flujo de la figura 12 y 13.

T1	
G17	
G21	
G0Z21.8712	
G0X0.0000Y0.0000S1.2000M3	Rango de interpolación 1
G0X25.0000Y25.0000Z5.0000	para buscar el origen
G1Z-2.2398F508	
G1Y75.0000F1270.0	Rango de interpolación 2, Corte 1
G1Z-2.8712	
G1X75.0000	Rango de interpolación 3, Corte 2
G1Z-2.9555	
G1Y25.0000	Rango de interpolación 4, Corte 3
G1Z-2.9124	
G1X25.0000	Rango de interpolación 5, Corte 4
G0Z-2.2398	
G0X150.0000Y150.0000Z.25.2398	Rango de interpolación 6, para localizar una nueva posición

Figura 11 Nueva interpolación en los ejes.

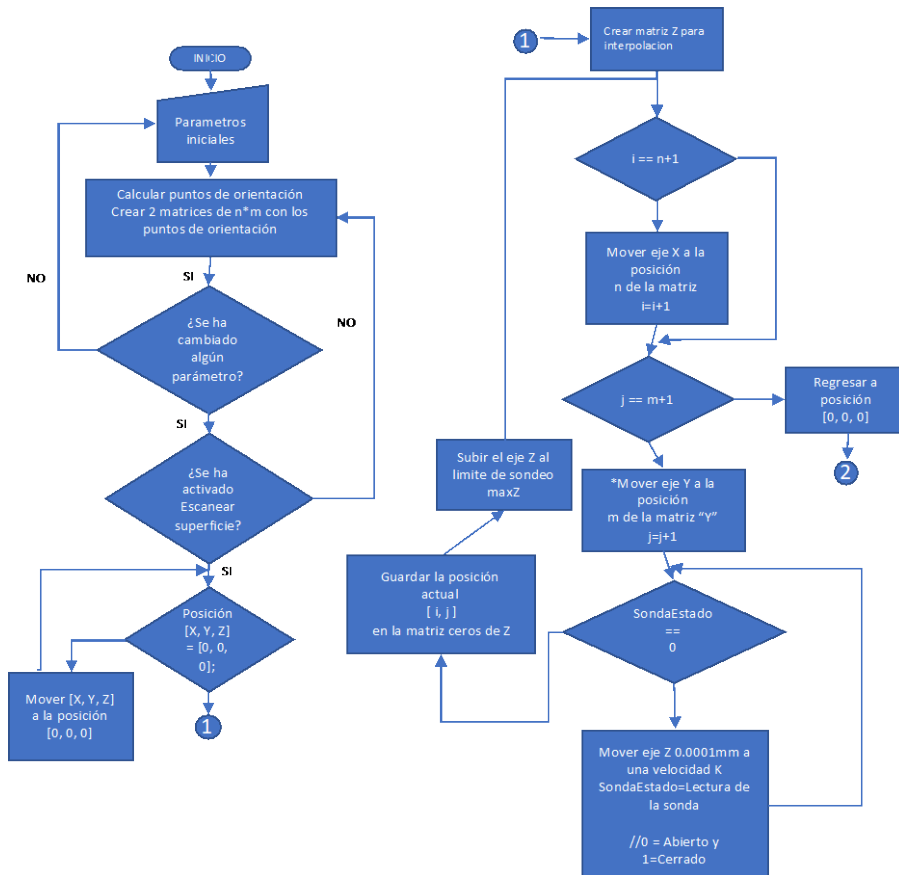


Figura 12 Diagrama de flujo del algoritmo empleado parte 1.

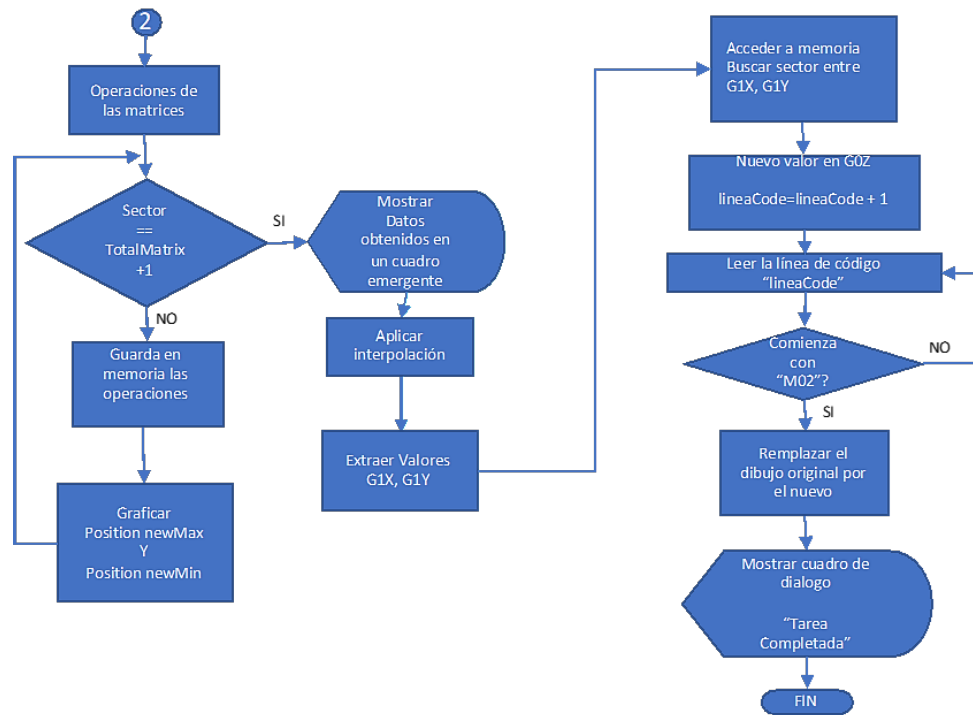


Figura 13 Diagrama de flujo del algoritmo empleado parte 2.

### 3. Resultados

Para llevar a cabo el experimento se diseñó un “PCB” y un dibujo para ser grabado en madera con una deformación exagerada, para esto se usó el software “Inkscape” [Norton, 1999]. Posteriormente se importó al “UGS” y se abrió la extensión que se añadió. En el caso del “PCB” se puede usar directamente la superficie de la baquelita para la sonda de contacto.

En la figura 14 se puede observar el dibujo original y la forma en la que se secciona el dibujo. Los puntos negros representan las muestras capturadas por la sonda sobre el material. En la figura 15 se muestra el resultado obtenido después de sondear toda la superficie del material. Como se puede observar en los colores, el color verde indica que el rango de deformación es mínimo, casi insignificante, mientras que el rojo indica que la superficie cambia bruscamente, también muestra un mensaje con los datos obtenidos del sondeo. Por último, la figura 16 muestra como se ve el dibujo una vez aplicado el algoritmo.

De las figuras 15 y 16 se puede observar que algunas letras como la ‘A’, ‘C’ y ‘N’ tienen una ligera deformación, mientras que las curvas del logo se ven como si



tuvieran irregularidades. También se observa que los círculos o las curvas se deforman con líneas rectas, esto es debido a que se usó interpolación lineal en vez de interpolación polinomial.

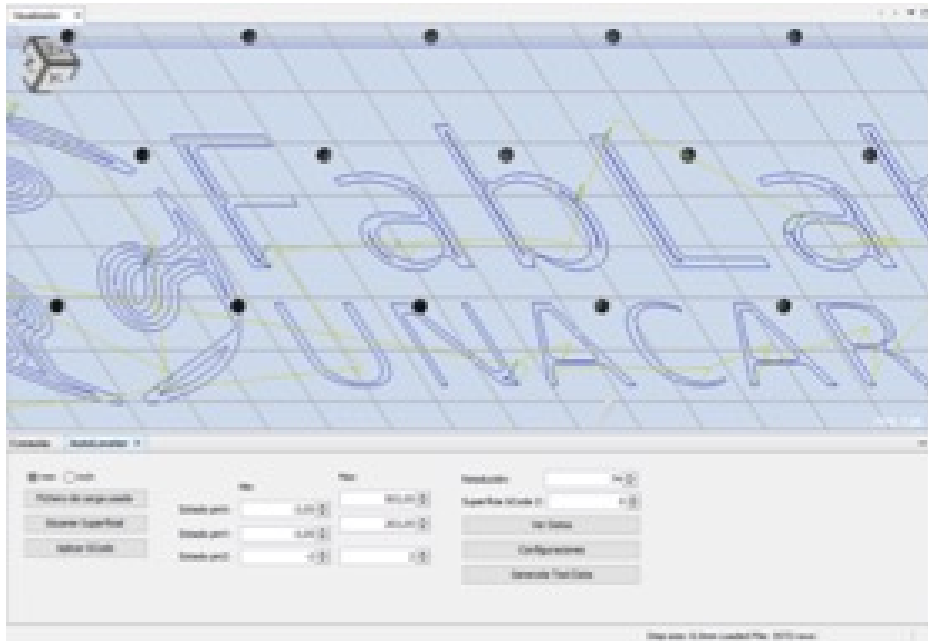


Figura 14 Dibujo original con una resolución de 74.

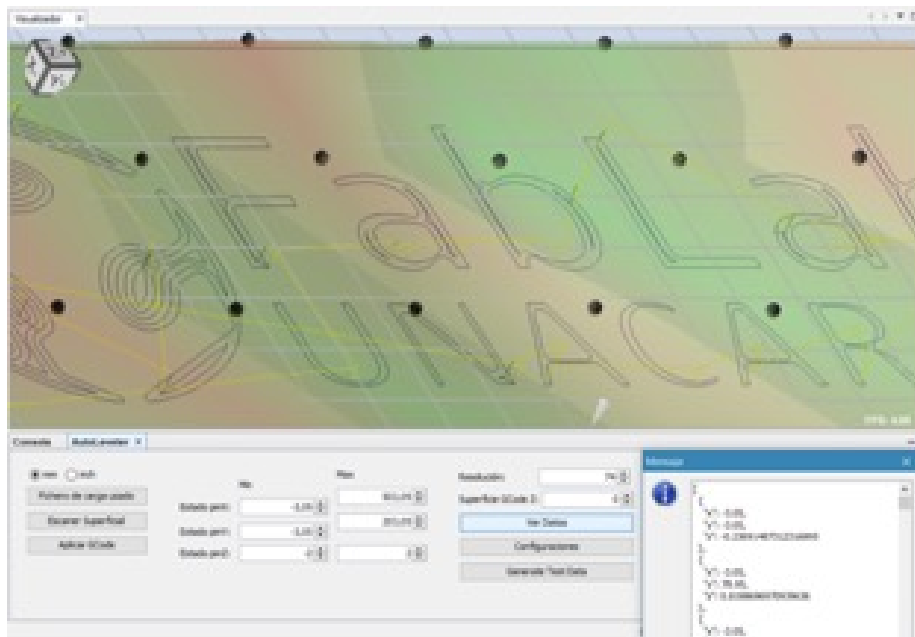


Figura 15 Recopilación de datos de áreas verdes= deformación mínima, áreas rojas = deformación más alta.

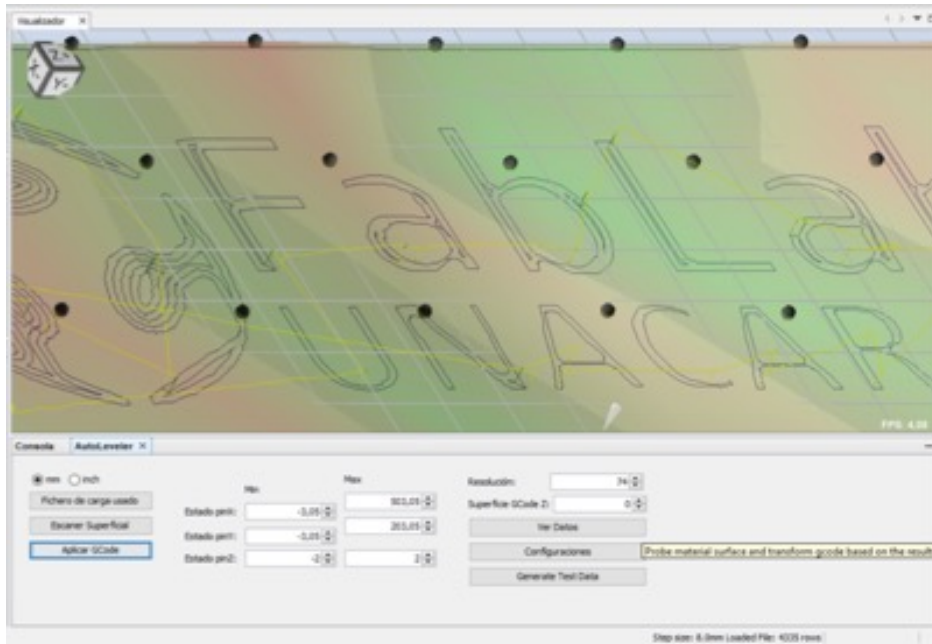


Figura 16 Aplicando interpolación.

Adicionalmente, se realizó el mismo proceso para un PCB. Primero se realizó una prueba de control, sin el auto nivel, como se muestra en la figura 17. Se puede observar que los cortes son irregulares y con mala definición. Posteriormente se sondea la superficie de la baquelita aprovechando el área de cobre donde se solda un cable directamente al Arduino. Este último resultado, utilizando el algoritmo de interpolación lineal, se muestra en la figura 18. Como se puede observar la precisión del PCB de la figura 18, con respecto al PCB de la figura 17, es ampliamente superior y limpia.

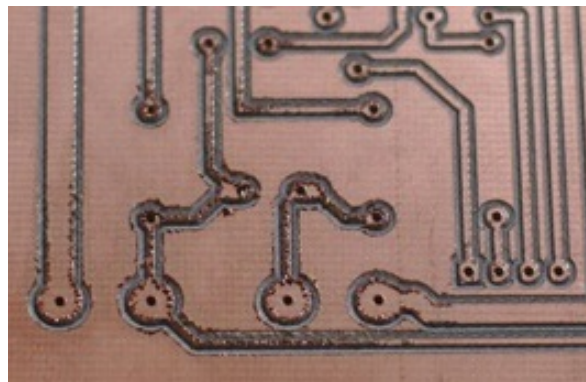


Figura 17 Implementación de un PCB sin interpolación.

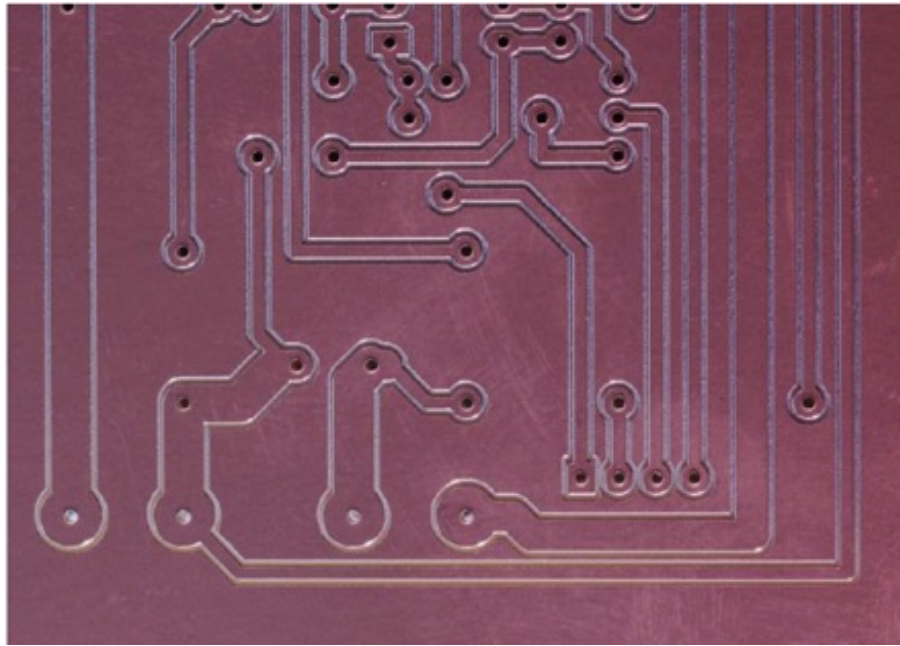


Figura 18 Implementación de un PCB con interpolación.

#### 4. Discusión

Existen algunos inconvenientes con este tipo de implementación, por ejemplo: cuando el número de líneas de código es grande, se requiere que el tamaño del buffer para la comunicación con el Arduino sea más grande; además, con este tipo de implementación el eje Z trabajará más, sin mencionar el esfuerzo que hace cada que sube y baja el router, por lo tanto se calentará más, sin embargo, esto es fácil de solucionar, basta con que en lugar de trabajo tenga una buena ventilación, o no se le exija trabajos muy largos al CNC. Por otro lado, para la fabricación de circuitos impresos los resultados fueron sorprendentes, el tiempo de maquinado de un PCB es mucho menor que cuando se utiliza cloruro férrico, además es más preciso al momento de hacer pistas estrechas. Este algoritmo funciona únicamente para la extensión.gnc de la distribución de “*ShapeOko*”.

#### 5. Conclusiones

En este trabajo se presentó una alternativa de mejora como software, para la implementación de una máquina CNC de código abierto, el cual fue modificado de acuerdo a las necesidades del presente trabajo. Al tener una “CNC Casera”,

fabricada con materiales reciclados y madera muchas veces no se obtienen trabajos de buena calidad, sin embargo, el uso del software de autonivelación resuelve muchas de las imperfecciones al momento de la implementación. Adicionalmente al auto nivelar la superficie de la cama de trabajo de la CNC puede servir como un límite por software en caso de no tener finales de carrera físico y así evitar que la máquina se termine destruyendo por la fuerza de los motores a paso o del router de fresado. Los resultados obtenidos son satisfactorios, mostrando que el algoritmo utilizado es eficiente para los casos aquí planteados.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Altintas Y. and Khoshdarregi M. R.. Contour error control of CNC machine tools with vibration avoidance, *CIRP Annals*, Elsevier, 61(1), 335-338, 2012.
- [2] Barahona E. A. T., León-Medina J. X. and Díaz E. T. Sistema de posicionamiento aplicado a la técnica de impresión 3d modelado por deposición fundida. *Revista de investigación, desarrollo e innovación*, 3(1), 25-32, 2013.
- [3] De Luca Penaccia, A., De la Fraga, L. G. (2009). A tool for errors detection in printed circuit boards production. *Journal of Applied Research and Technology*, 7(1), 41-50.
- [4] Luis S. (2015). Desnivel en la mesa de trabajo: <https://frs-cnc.com/foro1/mach/25243-desnivel-en-la-mesa-de-trabajo>, mayo de 2018.
- [5] Kaushik S. and Ashraf J. Automatic PCB defect detection using image subtraction method. *International Journal of Computer Science and Network*, 2012.
- [6] Norton R. *Diseño de máquinas*, AlfaOmega. 1999.
- [7] Shaowei Zhua, Guofu Dinga, Shengfeng Qinb, Jiang Leiab, Li Zhuanga and Kaiyin Yan. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, 52(1), 24-29, 2012.
- [8] ShapeOko. (2018). G-Code de shapeoko: <https://www.shapeoko.com/wiki/index.php/G-Code>, mayo de 2018.

# **GENERADOR DE PROBLEMAS E INTEGRADOR DE BATERÍAS DE EXÁMENES PARA EL CURSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA**

*PROBLEM GENERATOR AND BATTERY INTEGRATOR OF EXAMS FOR THE COURSE OF NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*

**Hugo Pablo Leyva**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*hpl@correo.azc.uam.mx*

**Rafaela Blanca Silva López**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*r.silva@correo.ler.uam.mx*

## **Resumen**

La estrategia de aprendizaje basada en problemas, aplicada en cursos de ingeniería produce resultados favorecedores que impactan en el aprendizaje de la temática disciplinar. Sin embargo, no hay bibliografía que ofrezca una cantidad considerable de problemas y soluciones. Adicionalmente, es necesario cambiar los problemas utilizados en tareas y exámenes cada ciclo escolar, para que el estudiante no tenga las respuestas de los mismos previamente. El objetivo de este trabajo fue desarrollar software para generar problemas de Métodos Numéricos en Ingeniería, así como sus soluciones, para los cursos impartidos en la UAM Azcapotzalco. Estos se pueden usar para tareas o exámenes. El software selecciona los problemas adecuados para un examen. Se genera un archivo en formato XML, a partir de los problemas generados para construir la batería de problemas para los exámenes en el LMS Sakai. La generación de baterías de problemas, minimizan el tiempo de captura en el LMS, para la elaboración y aplicación de los exámenes.

**Palabras Claves:** Aprendizaje basado en problemas, baterías de problemas para exámenes, generador de problemas y soluciones, métodos numéricos.

## **Abstract**

*The problem-based learning strategy, applied in engineering courses, produces favorable results that impact on the learning of the subject matter. However, there is no bibliography that offers a considerable amount of problems and solutions. Additionally, it is necessary to change the problems used in homework and exams every school year, so that the student does not have the answers of them previously. The objective of this work was to develop software to generate problems of Numerical Methods in Engineering, as well as their solutions, for courses taught at UAM Azcapotzalco. These can be used for assignments or exams. The software selects the appropriate problems for an exam. A file is generated in XML format, from the problems generated to build the battery of problems for the exams in the LMS Sakai. The generation of batteries of problems, minimizes the time of capture in the LMS, for the elaboration and application of the exams.*

**Keywords:** *Numerical methods, problem based learning, problem batteries for exams, problem generator and solutions.*

## **1. Introducción**

El curso de Métodos Numéricos se imparte en cuatro de los campus de la Universidad Autónoma Metropolitana en diversas Licenciaturas de Ingeniería, y debe ser ofertado aproximadamente a 500 alumnos en cada ciclo escolar.

Una de las actividades que demanda mucho trabajo para el profesor es la preparación de problemas para la clase, problemas que el alumno resuelve de tarea y problemas que se incluyen en los exámenes. Dichos problemas deben modificarse en cada ciclo escolar para evitar que los alumnos cuenten previamente con las soluciones. Por tanto, la generación de problemas y soluciones de éstos demanda un tiempo considerable por parte del profesor si se considera que el curso está integrado por 8 temas, lo que implica que el profesor debe preparar y resolver un mínimo de 40 problemas por ciclo escolar, preparando al menos 5 problemas por cada tema, uno de ejemplo para la clase, otros 2 de tarea, y otros 2 para el examen. Si esta actividad se realiza de forma manual es común que se presenten errores al resolverlos y por tanto se vean afectadas las calificaciones de

los alumnos. O bien, es posible generar problemas cuya solución requiera de un gran número de iteraciones para llegar a un valor aceptable aproximado, lo que implica que el tiempo requerido por parte del alumno para resolver el problema exceda el tiempo destinado para resolver y entregar su examen.

Aunado a lo anterior, si se pretende aplicar la modalidad de educación en línea donde se permite atender grupos de alumnos numerosos (más de 100 alumnos por grupo), el problema se vuelve crítico. Por tanto, es necesario apoyarse en el uso de un LMS (Learning Management System), pues ofrecen la posibilidad de manejar una batería de problemas, de tal forma, que se pueden aplicar muchas versiones de un examen sin que se repitan.

No obstante, se presenta el inconveniente de generar tantos problemas como fuese necesario, para alimentar la batería para los exámenes en la plataforma LMS, dada la gran cantidad que se requiere de ellos. Lo anterior genera la necesidad de desarrollar programas que generen tantos problemas y sus soluciones como se requieran para el curso, cuidando que no se repitan de un ciclo escolar a otro, garantizando además que el número de iteraciones necesarias para resolver el problema se realice en un tiempo finito y el alumno pueda resolverlo en el tiempo destinado a la solución de su examen. También hay que generar las baterías de problemas para alimentar al LMS, y poder aplicar exámenes distintos en cada ciclo escolar.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un software para generar los problemas utilizados en el curso de Métodos Numéricos en Ingeniería, así como sus soluciones para evitar la repetición de problemas de un ciclo a otro.

El programa considera la parametrización de la solución de cada problema contemplando el número máximo de iteraciones, el número específico de cifras significativas y considera la generación de problemas que convergen en pocas iteraciones. Por último, se desarrollaron programas para generar archivos XML y realizar la carga de las baterías de problemas como parte de los exámenes en el LMS Sakai, lo que permitió generar exámenes con 1000 o más problemas distintos. Con esto se garantiza que los alumnos no tendrán un mismo examen.

## **Trabajos relacionados**

Los trabajos relacionados se clasifican en dos secciones, en la primera se consideran trabajos asociados al aprendizaje basado en problemas, y la otra se enfoca en trabajos cuyo objetivo es el desarrollo de programas para generar algún tipo de problema que requiere resolverse mediante un método numérico.

## **Aprendizaje basado en problemas**

El estudio de sistemas de vibraciones no lineales, se realiza usando la técnica de elemento finito, que pertenece a los métodos numéricos. El aprendizaje basado en problemas, se usa para entrenar estudiantes de Ingeniería Mecánica [Palevicius et al., 2006].

El LMS Moodle en versiones recientes, ha incorporado 2 módulos que implementan el aprendizaje basado en problemas [Mateo-Sanz et al., 2013]. Uno de estos módulos permite definir preguntas con valores numéricos aleatorios, que podrían servir para estudiar técnicas numéricas.

En cursos de Electromagnetismo, los estudiantes se entrenan haciendo uso del aprendizaje basado en problemas, elaborando software que use el finite difference time domain method (FDTD) [Mias, 2008].

Los trabajos realizados tienen diferentes enfoques:

- Emplear el aprendizaje basado en problemas a un tipo específico de problemas.
- Agregar módulos a un LMS, para implementar el aprendizaje basado en problemas, con preguntas que generen valores numéricos aleatoriamente.

## **Generadores de problemas numéricos**

Existen trabajos en los que se presentan desarrollos de software o herramientas para la generación de problemas numéricos. Tal es el caso de e-status, que es una herramienta web capaz de generar problemas numéricos, se enfoca en la generación de problemas de estadística, y no de métodos numéricos [González et al. 2002], [González et al. 2010], [González, 2014]. Por otro lado, existen repositorios de problemas ya elaborados, por ejemplo, hay un repositorio de



problemas para ingeniería química, en el que se presenta una colección de 10 problemas numéricos [Cutlip et al. 1998]. Se trata de problemas típicos en la práctica de la ingeniería química, que requieren solución numérica. Los autores evalúan la solución de los mismos con varios paquetes de software.

Otro enfoque es el uso de software que resuelve un tipo específico de problemas [Dolezal, 1996], tal es el caso del uso del software denominado Op<sup>ti</sup>A, que resuelve problemas de programación matemática, relacionados con problemas de optimización. En este trabajo, tampoco se desarrolla un generador de problemas. Por último, se localizó un trabajo en el que se resuelven problemas de ecuaciones diferenciales parciales [Hake, 1987], utilizando diversos paquetes de software.

Por tanto, los trabajos realizados tienen diversos enfoques:

- La tendencia a usar paquetes ya existentes de software, para resolver un tipo específico de problemas.
- Usar un repositorio de problemas ya elaborados y resolverlos también con software existente que contienen una cantidad pequeña de problemas.
- Desarrollar un software que genera problemas numéricos.

Para el último caso el trabajo que se localizó aborda la generación de problemas para cursos de estadística, no para métodos numéricos en ingeniería. Ninguno de estos softwares genera una batería de problemas que pueda ser usada para generar exámenes en un LMS.

## **2. Métodos**

La metodología que se considera para el desarrollo del software planteado utiliza SCRUM como base para la gestión de proyectos de forma ágil.

El diseño del software contempla las siguientes restricciones para cada tema que se aborda en torno a los métodos numéricos:

- Selecciona una plantilla de un problema que se resuelve con algunos de los Métodos Numéricos, esto es, un problema cuyas características sea útil para mostrar los problemas típicos que hay que resolver mediante métodos numéricos.

- Se parametriza el problema para la generación de problemas con el mismo grado de complejidad, esto es, se generalizan las ecuaciones del problema, para que baste con cambiar algunos de sus coeficientes, para obtener un problema distinto, sin hacerlo más complejo que otro, con valores diferentes para estos coeficientes.
- Selecciona el método numérico que servirá de base para determinar el número de iteraciones para resolver el problema con una precisión específica, de modo que un alumno pueda resolverlo manualmente en un tiempo razonable, esto es, de los diferentes métodos numéricos que se cubren en el curso, se elige el método más recomendado o ilustrativo para resolver el problema planteado de tal manera que se obtenga la solución en un número razonable de iteraciones para una precisión típica requerida en este tipo de problemas.
- Se contempla un módulo programático que genere y resuelva los problemas propuestos, esto es, es insuficiente con plantear el problema numérico, si este no se resuelve, para validar el número de iteraciones requeridas para una precisión dada.
- Se eligen los criterios para seleccionar de los problemas generados, cuales se usarán para la batería de exámenes, esto es, de los problemas generados, no todos son útiles para un examen, sobre todos si tienen varias soluciones, y el alumno podría no saber cuál solución reportar, así que se eligen criterios para que el problema cuente solo con una solución adecuada para preguntarla en un examen, y el alumno tenga claro que esta es la única que se le solicita encuentre.
- Se diseñe e implemente programa que genere un archivo en formato XML necesario para generar la batería de problemas para exámenes SAKAI LMS, en función de criterios anteriores, esto es, tomando en cuenta consideraciones anteriores, solo una porción de los problemas generados será seleccionada para crear archivo de la batería de problemas para LMS.
- Se prueban las baterías de problemas en el LMS, generando exámenes en el LMS a partir de las baterías y se aplican exámenes durante un curso,

esto es, para probar que efectivamente los problemas usados fueron adecuados para el objetivo de usarlos en exámenes.

- Se realizan los ajustes necesarios en función de los resultados obtenidos en las pruebas, esto es, según se fuese encontrando fallas en los problemas usados, según la experiencia de los alumnos, estos fueron corregidos en los programas respectivos.

En la figura 1 se muestra el diagrama de flujo de esta metodología.

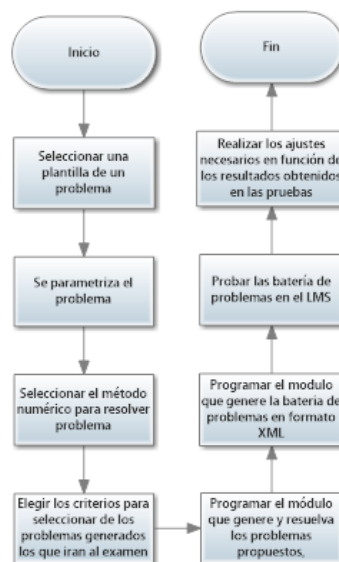


Figura 1 Diagrama de flujo de la metodología para generar la batería de problemas.

Los programas fueron desarrollados en korn shell script, lenguaje C y FORTRAN. La estructura del archivo en formato XML requerida para las baterías de problemas de exámenes del LMS Sakai está compuesto de:

- *Encabezado*. Esta es la parte inicial, donde se especifica la versión de XML y el encoding. También se define el título, donde se indica la batería de problemas a la que se destina el archivo generado.
- *Cuerpo*. Esta parte es la que se construye con los distintos problemas que se han generado, y que han cumplido las condiciones necesarias para formar parte de un examen. Es la sección más larga del archivo. Contiene el código para que el LMS presente al alumno el problema que resolverá.

- *Final.* Esta es la parte que cierra el archivo.

Una vez generado el archivo XML de la batería de problemas, los pasos para hacer la carga masiva de problemas en el LMS de SAKAI son:

- Descargar el archivo generado en el equipo local. Se realiza con un cliente de secure shell.
- Desde un navegador conectarse al LMS SAKAI.
- Iniciar sesión y seleccionar el curso correspondiente.
- Ir a la herramienta de exámenes, usar el botón de Batería de preguntas y seleccionar importar batería.
- Usar el botón de examinar y elegir el archivo descargado en el equipo local, seleccionar abrir y usar el botón de importar.

Dependiendo del número de problemas de la batería, el proceso puede tardar algunos minutos. Ya con la batería en el servidor de Sakai, fácilmente se puede configurar un examen con 1000 o más problemas, lo que hará muy complicado que dos alumnos presenten el mismo examen, y puedan pasarse las respuestas.

### 3. Resultados

Se implementaron 16 pruebas para las baterías de problemas del tema de ajuste de curvas. De los 1000 problemas generados, la totalidad de ellos se enviaron al archivo XML, de la batería generada. Esto en el ciclo escolar comprendido del trimestre 15-O a 18-I, figura 2.

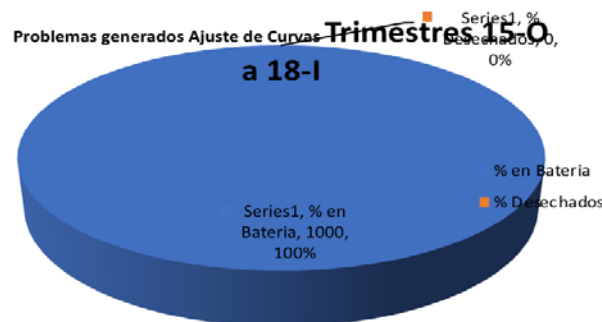


Figura 2 Problemas de ajuste de curvas.

Se hicieron 11 pruebas para las baterías de problemas del tema de derivación numérica. Del total de problemas generados (se probó con 300, 500, 1000) se enviaron al archivo XML de la batería generada el triple de ellos, esto fue, por que en cada problema se piden 3 derivadas, al principio, mitad y final de la tabla. De cada una de ellas se obtiene un problema para examen. Esto en en el ciclo escolar comprendido del trimestre 15-O a 18-I, figura 3.

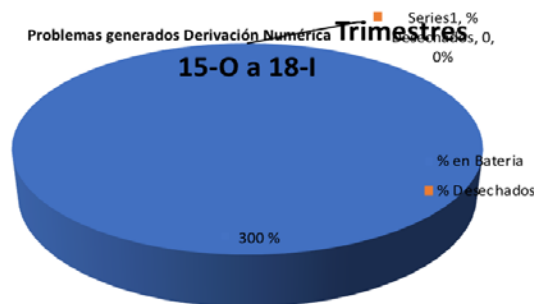


Figura 3 Problemas de derivación numérica.

Se realizaron 8 pruebas para las baterías de problemas del tema de integración numérica. De los 1000 problemas generados, se enviaron al archivo XML de la batería generada un promedio del 99.4%. Esto fue porque muy pocos problemas no pasaron el filtro converger en las iteraciones solicitadas. Durante el ciclo escolar comprendido del trimestre 15-O a 18-I, figura 4.

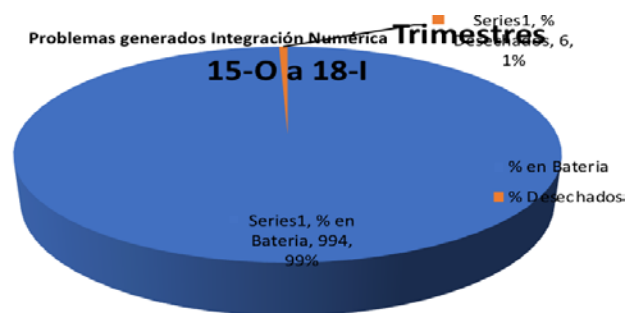


Figura 4 Problemas de integración numérica.

Se conformaron 11 pruebas para las baterías de problemas del tema de interpolación. De los problemas generados, se enviaron al archivo XML de la batería generada un promedio del 51.1%. Esto fue porque, del total de problemas,

algunos eran de interpolación inversa. Durante el ciclo escolar comprendido del trimestre 15-O a 18-I, figura 5.

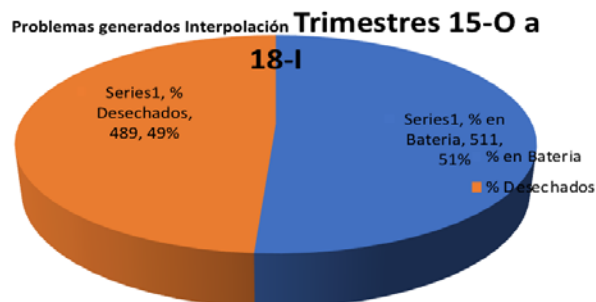


Figura 5 Problemas de interpolación.

Se implementaron 12 pruebas para las baterías de problemas del tema de raíces de ecuaciones no lineales. De los problemas generados, se enviaron al archivo XML de la batería generada un promedio del 117%. Esto es porque de un solo problema generado, la ecuación tiene más de una raíz que cumplen los criterios que se designaron. Las ecuaciones pueden tener 2 raíces con signos opuestos, algunas una sola raíz, y otra una sola raíz de un signo. Como resultado se obtuvieron más problemas para los exámenes que para los ejercicios de tareas. Esto en el periodo del trimestre 15-O a 18-I, figura 6.

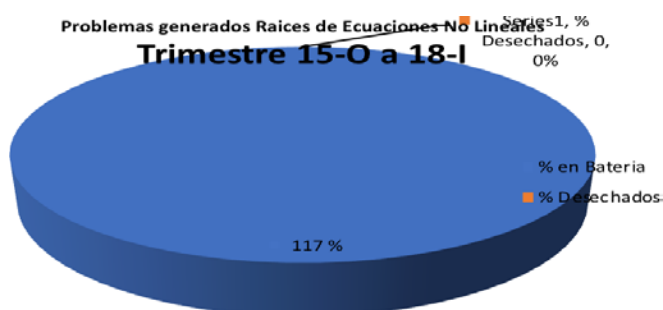


Figura 6 Problemas de raíces de ecuaciones no lineales.

Se realizaron 10 pruebas para las baterías de problemas del tema de sistemas de ecuaciones lineales. De los problemas generados, se enviaron al archivo XML de la batería generada un promedio de 78.6%. Esto es porque, se generan 2 sistemas por problema. Uno estable y uno inestable. Se descartan los sistemas que no

tienen solución por tener todo un renglón de ceros. Durante el periodo del trimestre 15-O a 18-I, figura 7.

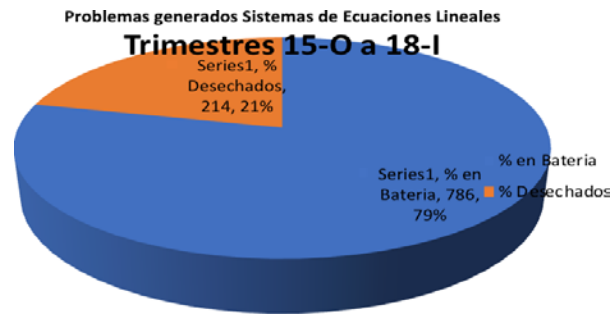


Figura 7 Problemas de sistemas de ecuaciones lineales.

Por último, se hicieron 12 pruebas para las baterías de problemas del tema de sistemas de ecuaciones no lineales. De los problemas generados, se enviaron al archivo XML de la batería generada un promedio de 163 %. Esto es porque, se generan sistemas con más de una raíz. Una con  $x > 0$  y la otra  $x < 0$ . Durante el periodo del trimestre 15-O a 18-I, figura 8.

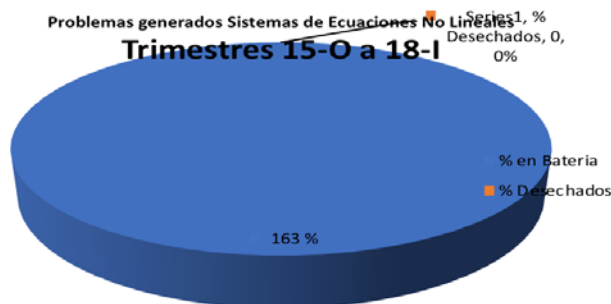


Figura 8 Problemas de sistemas de ecuaciones no lineales.

#### 4. Discusión

De la cantidad de problemas generados, se obtienen los problemas que se usan de ejemplo en clase, se dejan de tarea al estudiante y se integran en las baterías de exámenes en la plataforma LMS Sakai.

Los exámenes en línea se configuraron a partir de la batería de problemas generados, cuidando que se mantuviera el mismo nivel de complejidad, lo que disminuyó de manera considerable el tiempo dedicado a la preparación de

problemas y su respectiva carga en la plataforma LMS. Comparando con el tiempo necesario para generar problemas a mano, resolverlos, publicarlos en el LMS, modificarlos cada trimestre, la diferencia en tiempo ha sido abismal.

Se contemplo la opción de tener exámenes de entrenamiento que permiten al alumno ejercitarse resolviendo problemas antes de realizar su examen de cada tema del curso. El alumno tiene una cantidad ilimitada de oportunidades para realizar los exámenes de entrenamiento, mientras que para el examen por tema pueden repetirlo hasta 3 veces.

## **5. Conclusiones**

El software desarrollado para la generación de problemas considera los 8 temas del curso de métodos numéricos en ingeniería: Teoría de errores, Raíces de ecuaciones no lineales, Sistemas de ecuaciones lineales, Sistemas de ecuaciones lineales, Interpolación, Integración numérica, y Diferenciación Numérica. Se garantiza que los problemas tengan el mismo nivel de complejidad.

Se desarrolló un módulo adicional para generar baterías de problemas para facilitar la carga en el LMS y poder aplicarlos en línea, con esto se evita tener que diseñar problemas a mano, resolverlos y validar que se puedan resolver en un tiempo razonable por los alumnos durante un examen. Se observó que los alumnos no pueden contar con las respuestas del examen, aunque lo realicen varias veces o entre diferentes ciclos escolares.

Tener herramientas que automaticen la generación de problemas y se cuente la versión en formato XML para realizar la carga masiva de reactivos para exámenes es un apoyo invaluable para el docente y garantiza que el alumno realice problemas distintos desde la plataforma una gran cantidad de ocasiones.

Adicionalmente, al tener el alumno la posibilidad de ejercitarse resolviendo problemas similares a los que se incluyen en su examen, mejora el aprendizaje y los resultados obtenidos en sus evaluaciones.

Como trabajo futuro se pretende:

- Generar código Latex para generar las ecuaciones, integrales, derivadas, etc. como imágenes y estas queden más claras para el alumno.



- Desarrollar software que genere problemas y sus soluciones para otras temáticas como es el caso de probabilidad y estadística.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] González, J. Problemas numéricos con corrección automática: qué se puede y qué se debe hacer. A: V Jornadas para la Enseñanza y Aprendizaje de la Estadística y la Investigación Operativa. Madrid: Ministerio de Defensa, 35–52, 2014.
- [2] Cutlip, M.B., Hwalek, J.J., Nuttall, H.E., Shacham, M., Brule, J., Widmann, J., Han, T., Finlayson, B., Rosen, E.M. & Taylor, R. A collection of 10 numerical problems in chemical engineering solved by various mathematical software packages. *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 6, No. 3, 169–180, 1998.
- [3] González, J., Jover, L., Cobo, E. & Muñoz, P. A web-based learning tool improves student performance in statistics: A randomized masked trial. *Computers & Education*, Vol. 55, No. 2, 704–713, 2010.
- [4] González, J.A. et al. e-status: entorno web para la generación y resolución de problemas numéricos. In J. (Departamento de E. e I.O.U.P.C. Ginebra, ed. Jornada de Presentació de Resultats dels Projectes de Millora de la Docència. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya, 1–5, 2002.
- [5] Hake, J.F. The numerical solution of PDE problems with standard software packages. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, No. 20, 257–265, 1987.
- [6] Mateo-Sanz, J.M., Olive, C. & Puigjaner, D. Two New Moodle Modules for the Enhancement of a Problem-Based Learning Approach. *International Journal of Engineering Education*, Vol. 29, No. 4, 891–903, 2013.
- [7] Mias, C. Electronic problem-based learning of electromagnetics through software development. *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 16, No. 1, 12–20, 2008.
- [8] Palevicius, A., Palevicius, R. & Ciuciulkiene, N. A numerical learning method based on PBL approach for the Nonlinear vibration of mechanical systems. In

6th International Conference on Vibroengineering Ubicación: Kaunas Univ Technol, Kaunas, LITHUANIA. Kaunas, Lithuania: Kaunas Univ Technology Press, K Donelaicio 73, Kaunas Lt 3006, Lithuania, 87–90, 2006.

- [9] Dolezal, J. & Filder J. Numerical solution of dynamic optimization problems using parametrization and Op<sup>ti</sup> A software. Applied Mathematics and Computation, Vol. 78, No. 2-3, 111–121, 1996.

# **SISTEMA PARA GEOLOCALIZAR Y REPORTAR INCIDENTES RELACIONADOS CON LA SEGURIDAD DE USUARIOS EN UN CAMPUS UNIVERSITARIO**

*A SYSTEM FOR GEO-LOCALIZE AND REPORT USER SECURITY-RELATED EVENTS IN UNIVERSITY CAMPUS*

**Rodrigo Lino Osorio**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*royer\_lino@hotmail.com*

**José A. Reyes-Ortiz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jaro@correo.azc.uam.mx*

**Leonardo Sánchez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ldsm@correo.azc.uam.mx*

## **Resumen**

Los incidentes relacionados con la seguridad ocurren, cada día, con mayor frecuencia. Particularmente, en un campus universitario, estos incidentes están relacionados con la seguridad de la comunidad de usuarios. Es relevante que estos incidentes se categoricen y se conozca su información sustancial, tal como: ¿qué tipo de incidente ha ocurrido?, ¿dónde ocurrió?, ¿cuándo ha ocurrido? y ¿qué opina la comunidad de este incidente?, de esta manera, este artículo presenta un sistema para reportar ocho tipos de incidentes relacionados con la seguridad de los usuarios de un campus universitario, considerando el lugar y tiempo de ocurrencia, así como un aspecto colaborativo, el cual ayuda a conocer la opinión o la emoción generada en los usuario por dicho incidente. El sistema ha sido evaluado en el caso de estudio de la UAM unidad Azcapotzalco con el ingreso de 147 incidentes y ha mostrado resultados prometedores.

**Palabras Claves:** Clasificación de incidentes, incidentes relacionados con la seguridad, sistema colaborativo.

## **Abstract**

*Security-related incidents happen more frequently daily. In particular, within a university campus, such incidents are related to the security of the user community. It is relevant that incidents are categorized and their substantial information is known, such as: what type of incident has occurred?, where did it occur?, when did it occur? and what does the community think about this incident? Therefore, this paper presents a system to report eight types of incidents related to the security of university campus users, considering the place and time of occurrence, as well as a collaborative aspect, which helps to know the opinion or the emotion generated in the users by such incidents. The system has been evaluated in the study case UAM Azcapotzalco with the entry 147 incidents and it has shown promising results.*

**Keywords:** *Collaborative system, incident classification, security-related incidents.*

## **1. Introducción**

En la actualidad, el tema de seguridad se ha vuelto una de las principales preocupaciones en México, con base en la encuesta elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año 2017, se tiene que la Ciudad de México es uno de lugares donde hay mayor incertidumbre, debido a la alta incidencia delictiva que ocurre todos los días [INEGI, 2017].

En 2012 el INEGI ha creado la Clasificación Estadística del Delito (CED) para México [INEGI, 2012], en la cual define y detalla cada uno de los delitos con la finalidad de caracterizarlos e identificarlos y al mismo tiempo permitir agruparlos en una taxonomía del delito en México con fines útiles, prácticos para facilitar su instrumentación.

De acuerdo con [INEGI, 2012], uno de los incidentes que ocurre con mayor frecuencia es el robo, específicamente, el robo a transeúnte, y éste ocurre en los trayectos a la escuela, a los hogares, a los centros de trabajo, incluso en interiores de inmuebles, como edificios públicos.

La ocurrencia de los incidentes relacionados con la seguridad no es ajena en el interior de un campus universitario, donde suceden incidentes relacionados con la seguridad. Sin embargo, la comunidad universitaria desconoce información sobre

este tipo de sucesos, es decir, información sobre ¿cuándo sucedió el incidente?, ¿dónde sucedió?, ¿quiénes fueron los actores involucrados?, ¿cuál fue la causa del incidente?, así como se desconoce la opinión de la misma comunidad sobre dichos sucesos. Por ello, un sistema que sea capaz de registrar estos incidentes relacionados con la seguridad y su información aledaña, sería de gran utilidad para prevenir los riesgos a los que está expuesta la comunidad universitaria y la reincidencia de estos sucesos.

Existen diversas aplicaciones, sistemas o trabajos que han abordado el tema de incidentes relacionados con la seguridad con un aspecto colaborativo. En [Aguilar, 2010] se presenta un sistema conformado por una red social que almacena datos descriptivos y geográficos de denuncias sobre robos en la Ciudad de México, donde los usuarios comparten sus denuncias de manera colaborativa con el resto de los miembros de la red social. Por su parte, la aplicación móvil llamada CincoD [Krieger Electronics, 2018] proporciona una interface para reportar delitos, incidentes o situaciones de peligro en la delegación Benito Juárez de la CDMX, donde son atendidos por expertos en materia de seguridad y mediante compartir mensajes en la aplicación. El sistema presentado en [Yao-Wen, 2003] es una aplicación web utilizada para la evaluación de la seguridad pública recabando la opinión de los ciudadanos. También, en [Rodríguez, 2017] se presenta una aplicación de seguridad ciudadana orientada al sector turístico que contiene geolocalización de delitos en tiempo real, una clasificación de delitos y es una aplicación colaborativa. Finalmente, se presenta PF Móvil [Policía Federal, 2017] una aplicación que permite realizar reportes de delitos y establecer un vínculo entre la ciudadanía y el Centro Nacional de Atención Ciudadana (CNAC) que es parte de la Comisión Nacional de Seguridad (CNS) de México. Permite enviar reportes en forma de texto con la posibilidad de adjuntar multimedia (audio, foto o video), consultar reportes de incidentes en vías federales y hospitales cercanos; es posible solicitar información acerca de diferentes tópicos y emitir opiniones en las cuentas de diversas redes sociales.

Con el análisis del estado del arte se puede observar que el aspecto colaborativo juega un papel importante. Por lo tanto, en este proyecto se propone un sistema

de información colaborativo para el reporte de incidentes relacionados con la seguridad de la comunidad universitaria de un campus universitario. Como caso de estudio, se toma el campus de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) unidad Azcapotzalco. Además, una característica relevante de este sistema es el aspecto colaborativo, donde miembros de la comunidad universitaria son capaces de emitir sus comentarios opiniones y valoraciones sobre los incidentes reportados.

Para el desarrollo del sistema presentado en este artículo, se toma la taxonomía del delito presentada en [INEGI, 2012], se seleccionan aquellos incidentes que se adaptan a la situación de un campus universitario y, además, se agregan otros incidentes relacionados con la seguridad que son de interés para la comunidad universitaria. Esto genera como resultado los siguientes tipos de incidentes y su definición, considerados en el sistema de información presentado en este artículo:

- Robo a vehículos. Este tipo de incidentes se presenta cuando algún miembro de la comunidad fue víctima de alguna sustracción de cierto objeto que se hallaba dentro o fuera del vehículo estacionado.
- Robo a transeúnte. Hace referencia al incidente en el cual los miembros de la comunidad fueron despojados de algún objeto sin su consentimiento mientras estaban dentro o cerca de la unidad.
- Robo a aulas o instalaciones. Aplica para aquellos incidentes donde miembros de la comunidad fueron víctimas de alguna sustracción de cierto equipo o material de algún inmueble, como laboratorios, auditorios, talleres o cubículos.
- Bloqueos. Miembros de la comunidad o personas externas que impidan el acceso ya sea a algún edificio, pasillo o entradas de la unidad.
- Agresiones. Acontecimientos en los cuales los miembros de la comunidad se encuentran involucrados en un ataque o acto violento que pueda causar daño a los demás miembros.
- Incendios. Este tipo de incidentes se presenta en el caso de que miembros de la comunidad se percatan de un conato de incendio (fuego incipiente o inicial que puede controlarse), deben notificarlo a protección civil y ya

controlado o extinguido el fuego, si desean los usuarios pueden emitir alguna alerta en la aplicación propuesta.

- Fuga de gas u otro químico. Este incidente se presenta cuando algunos miembros de la comunidad perciben una eventualidad relacionada con gas, de la misma manera deben notificarlo a protección civil y si desean pueden registrar dicho suceso con la finalidad de extremar las medidas de precaución necesarias para evitar una explosión.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se presentan los métodos y módulos implementados en el sistema de reporte de incidentes relacionados con la seguridad. Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se muestran en la sección 3. Por su parte, la sección 4 expone las discusiones de los resultados obtenidos. Finalmente, la sección 5 explica las conclusiones y el trabajo a futuro.

## **2. Métodos**

El sistema de reportes de incidentes relacionados con la seguridad puede ser aplicado a cualquier campus universitario. En esta sección se presentan los módulos que pueden ser adaptados a cualquier campus universitario y posteriormente, en la Sección 3 Resultados, se presente el caso de estudio del campus universitario de la UAM Azcapotzalco. De esta manera, este sistema se compone de los siguientes módulos: módulo de información, módulo de registro de incidentes, módulo de consulta de incidentes y módulo colaborativo.

### **Representación de datos**

La información almacenada sobre los incidentes relacionados con la seguridad es de gran importancia ya que con dicha información los usuarios, miembros de la comunidad universitaria, podrán responder a preguntas acerca de los incidentes, tales como:

- ¿Dónde sucedió el incidente? para considerar esta pregunta se considera información sobre el espacio físico, es decir, el lugar de ocurrencia del incidente.

- ¿Cuándo sucedió el incidente? este cuestionamiento es abarcado por los datos sobre fecha y hora del incidente.
- ¿Qué tipo de incidente fue cometido? para lo cual se han considerado los tipos de incidentes presentados anteriormente.
- ¿Cuál fue la causa y el efecto del incidente? así como información adicional es considerada en la descripción libre del incidente, en la cual los miembros de la comunidad que reportan los incidentes emiten una descripción de este.
- Finalmente, la colaboración de la comunidad universitaria, para ello, se considera comentarios de los incidentes en texto libre y una valoración basada en una escala de 1 a 5.

Con la finalidad de que el sistema presentado pueda responder a las preguntas planteadas, se ha diseñado e implementado una base de datos que considera la información necesaria para dicho fin. En la figura 1 se muestra el diagrama entidad-relación de la base de datos a utilizar en nuestro sistema de reportes de incidentes relacionados con la seguridad para el interior de un campus universitario.

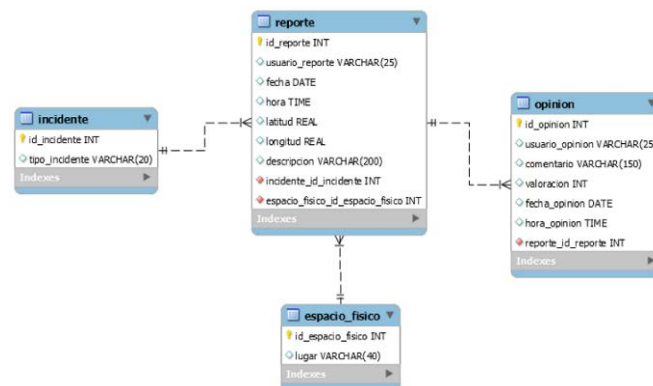


Figura 1 Diagrama Entidad-Relación de la base de datos del sistema.

## Registro de incidentes relacionados con la seguridad

El contar con la información de los incidentes ocurridos dentro del campus universitario, se convierte en una cuestión relevante para el sistema presentado en este artículo. Por lo tanto, en este sistema se ha desarrollado un módulo que permite a los usuarios proporcionar información de algún incidente ocurrido en un



campus universitario. La información solicitada es el tipo de incidente, fecha, hora, latitud, longitud, descripción, espacio físico de la unidad y, opcionalmente, el nombre del usuario que reporta. Esta información es almacenada en la base de datos mediante la implementación de la clase denominada *RegistroReporte.java*, la cual se muestra en la figura 2.

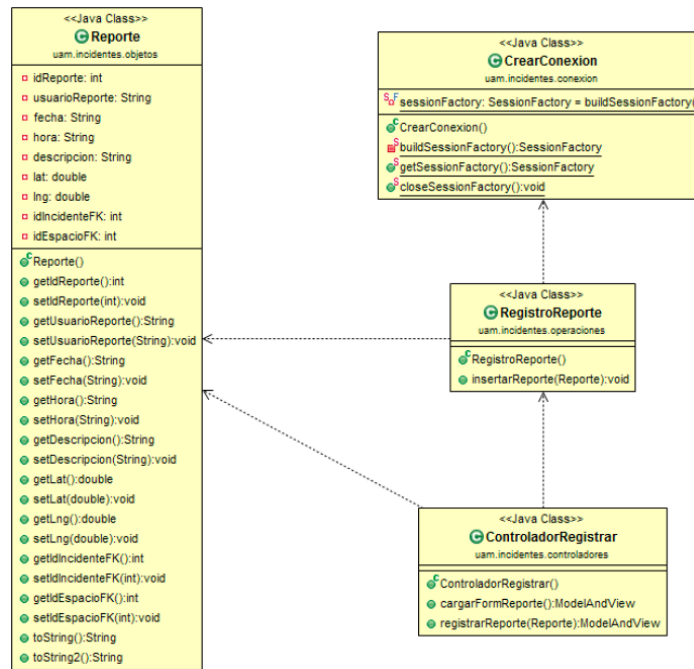


Figura 2 Diagrama de clases del sistema.

El detalle de la información a almacenar en la base de datos se describe a continuación:

- La fecha y hora se obtienen del sistema y, si el usuario desea cambiarlas, se despliega un calendario.
- La descripción y el nombre del usuario que reporta son opcionales y son textos libres.
- Un aspecto relevante y que hace innovador a este sistema es el uso de mapas para la ubicación del lugar donde ha sucedido el incidente. Para ello, se utiliza la *API de Google Maps* [Google Developers, 2018] que permite desplegar un mapa y obtener las coordenadas de un punto de interés a partir de estos datos del mapa de Google, INEGI México [INEGI, 2018].

- Asignación del tipo de incidente. El usuario puede elegir el tipo de incidente a reportar utilizando marcadores de diferentes colores, los cuales se muestran en la figura 3.

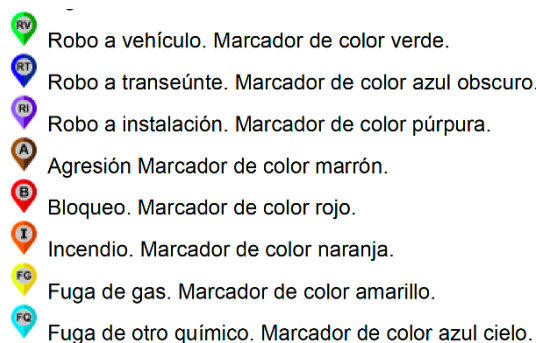


Figura 3 Marcadores para tipo de incidente.

### **Consulta de incidentes relacionados con la seguridad**

En esta sección se presentan las funcionalidades del sistema que permiten a los usuarios conocer con mayor detalle datos sobre los incidentes ocurridos en un campus universitario. El sistema colaborativo para reporte de incidentes relacionados con la seguridad de usuarios en un campus universitario es capaz de proporcionar información relacionada con las preguntas ¿qué tipo de incidente relacionado con la seguridad de usuarios ha ocurrido?, ¿dónde ha ocurrido un incidente específico? y ¿cuándo ha ocurrido un incidente específico?

La consulta de información relacionada al tipo de incidente ocurrido está relacionada con los marcadores para cada tipo de incidente y el mapa, como se muestra en la figura 4, la cual responde a la pregunta ¿qué tipo de incidente relacionado con la seguridad de usuarios ha ocurrido?

Por otro lado, también se cuenta con la consulta del lugar donde han ocurrido incidentes, para ello se utilizan los marcadores de los espacios físicos y el mapa, los cuales se muestran en la figura 5, con la finalidad de responder a la pregunta ¿dónde ha ocurrido un incidente específico? Finalmente, este sistema provee un camino para consultar incidentes por fecha relacionados con la seguridad de la comunidad en un campus universitario. Esta consulta corresponde a la pregunta ¿cuándo ha sucedido un incidente específico?, la cual se muestra en la figura 6.

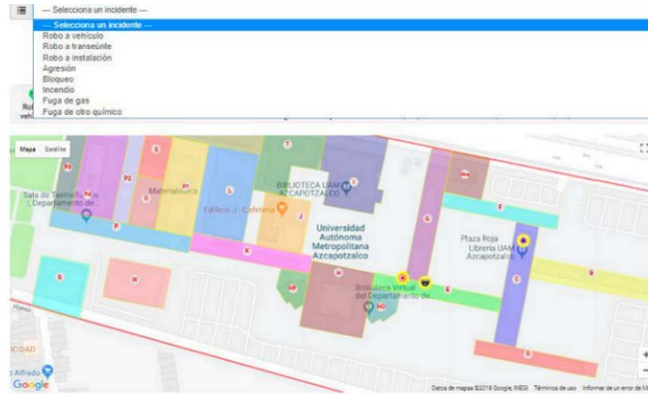


Figura 4 Consulta por tipo de incidente.

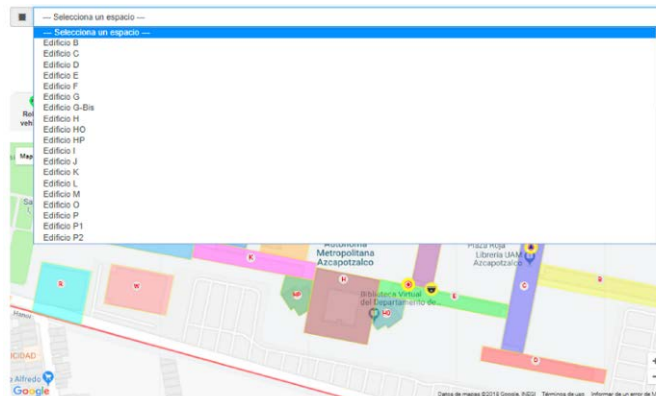


Figura 5 Consulta incidentes por ubicación.

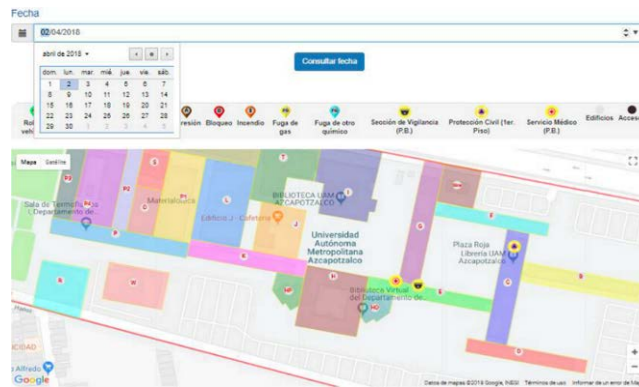


Figura 6 Consulta incidentes basada en tiempo.

## Colaboración de los usuarios

La opinión de los usuarios del sistema, miembros de la comunidad universitaria, sobre los incidentes es de suma importancia para el contexto social, ya que

proporciona una referencia a otros miembros de la comunidad sobre la veracidad, emoción, reacciones, causas o efectos del propio incidente. En este aspecto, el sistema presentado en este artículo permite que los miembros de la comunidad expresen sus opiniones sobre los incidentes en texto y utilizando una escala de valoración con estrellas. La escala de valoración con estrellas significa que el usuario indica la relevancia del incidente, de la siguiente manera: una estrella significa “nada relevante” y cinco estrellas es indicador “muy relevante”.

El miembro de la comunidad localiza su incidente de interés y emite un comentario, para lograr esta funcionalidad se ha implementado las clases mostradas en el diagrama de la figura 7.

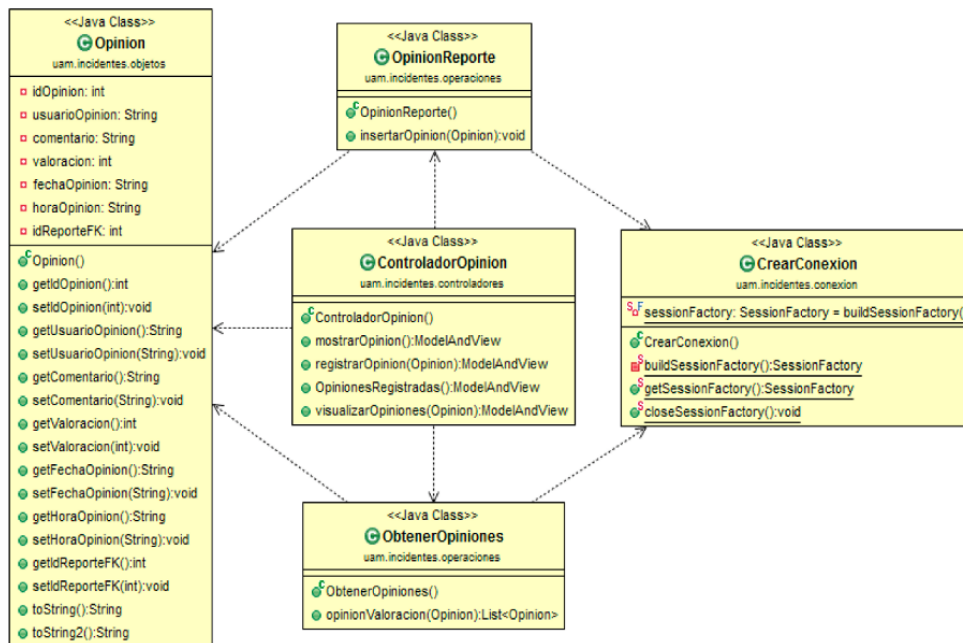


Figura 7 Implementación de la emisión de opiniones.

### 3. Resultados

En esta sección se presenta el caso de estudio de la UAM unidad Azcapotzalco, donde se adapta el sistema de reportes de incidentes relacionados con la seguridad de usuarios de un campus universitario, además se llevan a cabo una serie de pruebas con datos reales sobre espacios físicos, fechas, horas, opiniones, valoraciones y diversos tipos de incidentes.

## **Caso de estudio**

El sistema para reportar incidentes relacionados con la seguridad de usuarios de un campus universitario presentado en la Sección 2, se ha desplegado en el campus universitario de la UAM unidad Azcapotzalco como un caso de estudio. Para ello se han instanciado los mapas de este campus universitario con identificadores de 55 espacios físicos, entre los que destacan: edificios, plazas, áreas verdes, estacionamientos, puntos de venta y áreas deportivas. Un ejemplo de un identificador para una plaza pública, específicamente “Plaza de Biblioteca” se muestra en la figura 8. De cada identificador se obtiene su valor de latitud y longitud para su ubicación exacta en el mapa, lo cual se puede observar en la figura 8.



Figura 8 Espacios físicos del campus universitario UAM-Azcapotzalco.

Los tipos de incidentes a reportar y que están relacionados con la seguridad de la comunidad universitaria para el caso de estudio de la UAM-Azcapotzalco son: robo a vehículo, robo a transeúnte, robo a instalación, agresión, bloqueo, incendio, fuga de gas, fuga de otro químico. Para la consulta de incidentes el usuario puede seleccionar el tipo de incidente, el espacio físico o la fecha del mismo. En la figura 9, se muestra una consulta de incidente en un espacio físico específico dentro del caso de estudio de la UAM-Azcapotzalco, a saber: “Edificio H”.

Como parte esencial, el sistema presentado en este artículo proporciona la opción de que los usuarios del campus universitario expresen sus opiniones o emociones

generados por algún incidente relacionado con su seguridad. Este módulo otorga un valor agregado a este sistema ya que los demás usuarios pueden tomar decisiones basadas no solo en la información sustancial del incidente como la fecha, el lugar y el tipo, sino también, considerando las emociones de otros usuarios.



Figura 9 Consulta de incidentes por espacio físico de la UAM-Azcapotzalco.

Para ello, este sistema proporciona dos tipos de opiniones, como se puede observar en la figura 10:

- El usuario puede colocar un texto libre.
- El usuario puede calificar el incidente en “nada relevante” (una estrella) hasta “muy relevante” (cinco estrellas).

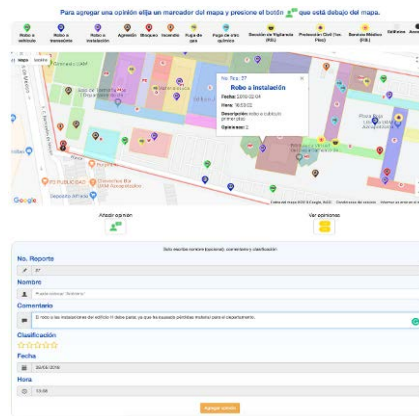


Figura 10 Opiniones de los usuarios sobre incidentes en la UAM-Azcapotzalco.

El sistema se ha implantado y puesto en marcha por dos meses en la UAM unidad Azcapotzalco. Durante este periodo de tiempo, en el sistema se han logrado reportar 147 incidentes relacionados con la seguridad.

#### **4. Discusión**

Durante el periodo de tiempo que se ha dejado funcionando el sistema y que ha logrado recabar información de 147 incidentes, no se ha reportado algún error, sobrecarga del mismo.

Estos 147 incidentes están distribuidos de la siguiente manera: 24 incidentes relacionados con el robo a vehículos, 30 reportes de robo a transeúnte, 30 robos a instalaciones, 33 agresiones a usuarios, 24 bloqueos, 3 incendio, 3 fugas de gas o algún químico. A partir de estos 147 incidentes, se generaron 76 opiniones escritas y valoraciones con estrellas.

El sistema ha estado desempeñando correctamente sus funcionalidades sustanciales: registrar incidentes, consultas incidentes por tipo, fecha y lugar del mismo. Por lo tanto, se considera que el sistema ha mostrado resultados prometedores, los cuales se miden por la precisión de las pruebas ejecutadas. Estas pruebas son evaluadas con la fórmula de precisión que es la razón de dividir el número de incidentes/opiniones correctamente almacenados o consultados entre el número total de incidentes/opiniones. En la tabla 1 se muestran los resultados de precisión para cada funcionalidad del sistema.

Tabla 1 Resultados de precisión de las funcionalidades del sistema.

<b>Funcionalidad</b>	<b>Precisión</b>
Registrar reportes	96 %
Consultar reportes	100 %
Agregar opiniones	97 %
Mostrar opiniones	100 %
Promedio	98 %

Los resultados mostrados por este sistema dan cuenta que existen incidentes relacionados con la seguridad que han perjudicado a diversos miembros de los campus universitarios, y prueba de ello, es el caso de estudio reportado en este

artículo, donde los usuarios del campus UAM Azcapotzalco han opinado o expresado emociones con sentimientos negativos hacia los incidentes.

Por lo anterior, con esta aplicación se espera proporcionar la información para que los usuarios tomen sus decisiones sobre evitar transitar por ciertos espacios físicos a determinadas horas.

## **5. Conclusiones**

En este artículo se ha presentado un sistema para reportar incidentes relacionados con la seguridad de los usuarios en un campus universitario. Se ha logrado su despliegue, como caso de uso, en el campus universitario de la UAM unidad Azcapotzalco. El sistema es capaz de responder las siguientes preguntas sobre los incidentes: ¿dónde ha ocurrido?, ¿cuándo ha ocurrido?, ¿qué tipo de incidente ha sucedido? y ¿qué opina la comunidad sobre algún incidente?, nuestro sistema ha estado en funcionamiento durante dos meses continuos generándose 147 incidentes y 76 opiniones de los mismos. Los resultados son prometedores, logrando una precisión promedio de 98 % de todo el sistema presentado.

El uso del sistema presentado en este artículo proporciona certidumbre e información oportuna a los miembros de la comunidad universitaria, a quienes les permite tomar decisiones sobre sus traslados dentro de un campus universitario basadas en los incidentes ocurridos. Así como evitar determinados espacios físicos en algunas horas del día. Por su parte, a las autoridades de vigilancia del campus universitario, este sistema les proporciona información sobre donde es necesaria mayor vigilancia o puntos de seguridad como la colocación de extintores. Como trabajo a futuro, el sistema de reporte de incidentes relacionados con la seguridad de usuarios de un campus universitario presentado en este artículo podría extenderse a otros casos de estudio, por ejemplo, el resto de unidades académicas de la Universidad Autónoma Metropolitana. El manejo de material visual, como audio, video o imágenes dentro de la funcionalidad de colaboración de usuarios, es decir, que los usuarios puedan emitir una opinión o alguna emoción mediante imágenes, es un aspecto a mejorar en el sistema. Por su parte, el sistema se podría extender a otros reportes de eventos relacionados con los usuarios, tales



como: eventos académicos, eventos deportivos y eventos culturales. Finalmente, es necesario llevar a cabo una evaluación centrada en el usuario, es decir, medir el impacto que está generando el aspecto colaborativo en el dominio de los incidentes relacionados con la seguridad de los usuarios de un campus universitario.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Google Developers. (2018). "Overview | Maps JavaScript | Google Developers", Maps JavaScript API: <https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/tutorial>.
- [2] INEGI, 2012. Clasificación Estadística de Delitos (CED): <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/clasificaciones/delitos.aspx>.
- [3] INEGI. (2017). Departamento de comunicación social, "Encuesta Nacional de Seguridad Pública Urbana (ENSU)". México: [http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2017/ensu/ensu2017\\_10.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2017/ensu/ensu2017_10.pdf).
- [4] INEGI, 2018, API de Google Maps: [https://www.beta.inegi.org.mx/servicios/api\\_google\\_maps.html](https://www.beta.inegi.org.mx/servicios/api_google_maps.html).
- [5] Krieger Electronics. (2018). CincoD - Vecino vigilante 1.0 [Aplicación móvil]: <https://www.cinco-d.com/>.
- [6] Policia Federal. 2017. [PF Móvil]: <https://www.gob.mx/policiafederal/articulos/aplicacion-pf-movil>.
- [7] Rodriguez, F. (2017). Woofic [Aplicación móvil]: <http://woofic.com/>.
- [8] Rodriguez, J. A. E., & Tapia V. H. (2010). Red social para la detección de zonas de riesgo y participación ciudadana para dispositivos móviles y computadoras personales. Tesis de licenciatura. Instituto Politécnico Nacional.
- [9] Yao-Wen, H., Shih-Kun, H., Tsung-Po, L., & Chung-Hung, T. (2003). Web application security assessment by fault injection and behavior monitoring. Proceedings of the 12th international conference on World Wide Web ACM. New York, NY, USA, 148-159.

# **MODELO PARA EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA PRODUCIDA EN UNA PLANTA DE ÓSMOSIS RETARDADA POR PRESIÓN**

*MODEL FOR EVALUATING THE ELECTRIC POWER OUTPUT OF PRESSURE RETARDED OSMOSIS GENERATION PLANT*

**Mario Llamas Rivas**

Universidad de Guanajuato  
*m.llamasrivas@ugto.mx*

**Alejandro Pizano Martínez**

Universidad de Guanajuato  
*apizano@ugto.mx*

**Iván Abel Hernández Robles**

Centro Mexicano de Energías Renovables SC  
*ia.hernandez@ugto.mx*

**Miguel Ángel Gómez Martínez**

Universidad de Guanajuato  
*gomezma@ugto.mx*

**Adrián González Parada**

Universidad de Guanajuato  
*gonzaleza@ugto.mx*

**Héctor Javier Estrada García**

Universidad de Guanajuato  
*hestrada@ugto.mx*

## **Resumen**

Las plantas de generación PRO producen energía eléctrica mediante el proceso de ósmosis retardada por presión (PRO, por sus siglas en inglés), el cual ocurre al mezclar dos soluciones de diferente concentración salina a través de una membrana semipermeable. El proceso PRO produce un caudal presurizado que impulsa un sistema turbina-generador eléctrico, generándose entonces potencia eléctrica. En este trabajo se presenta un modelo unificado para evaluar la producción de energía eléctrica de una planta PRO. El modelo permite evaluar la producción de potencia con un enfoque hacia el análisis del impacto de la integración de plantas PRO en la

operación de estado estacionario de redes de distribución de energía eléctrica. Para evaluar la generación de potencia eléctrica por medio del modelo propuesto se presenta dos casos de estudio. Los resultados obtenidos revelan que a mayor generación de potencia activa la planta PRO requiere un mayor consumo de potencia reactiva.

**Palabras Claves:** Gradiente salino, modelo para evaluación de generación de potencia eléctrica, ósmosis retardada por presión, planta de generación PRO.

## **Abstract**

*The PRO power generation plants produce electric energy based on the pressure retarded osmosis process (PRO), which is derived from mixing two solutions with different salinity concentrations through a semipermeable membrane. The PRO process produces a pressurized flow that propels a turbine-electric power generator system, allowing electric energy generation. This work presents a unified mathematical model able to evaluate the electric power output of a PRO power generation plant. The model allows evaluating the electric power output with a focus on the analysis of the impact on the electric distribution networks steady state performance produced by the integration of PRO plants. Two case studies are reported where the proposed model is used to evaluate the electric power output of the generation plant. The obtained results show that a major electric active power output of the PRO generation involves a major consumption of reactive power.*

**Keywords:** *Model for the evaluation of electric power generation, pressure retarded osmosis, PRO generation plant, salinity gradient.*

## **1. Introducción**

La tendencia de extraer y aprovechar la energía disponible en los océanos ha tomado gran importancia para ampliar la cartera energética a nivel mundial. Las fuentes de energía del océano que actualmente pretenden aprovecharse son las corrientes marinas, mareomotriz, oleaje, gradiente térmico y gradiente salino. Atendiendo a dicha importante tendencia, en México, estas fuentes definen las líneas pilares del Centro Mexicano de Innovación de Energía–Océano (CEMIE-O),

creado a través del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética [CEMIE-O, 2014]. Este trabajo se enmarca en el aprovechamiento de la energía del océano asociada al gradiente salino para la producción de energía eléctrica.

El gradiente salino tiene la más alta concentración de energía de todas las fuentes renovables marinas y se estima que cuenta con un potencial global de 1650 twhr por año y podría cubrir el 20% de la demanda energética mundial. En este sentido, es considerada una fuente atractiva por explorar [Tran, 2015]. La producción de energía por gradiente de salinidad no genera emisiones de gases CO<sub>2</sub> u otro tipo de desperdicios que puedan interferir con el cambio climático global. Además, desde una perspectiva de generación de energía eléctrica, posee grandes beneficios en comparación con otras fuentes de generación renovables bien establecidas, tales como la energía solar, la energía eólica y la energía geotérmica. Por ejemplo, a partir del gradiente de salinidad se podría generar energía eléctrica de manera continua. Mientras que la generación a partir de la energía del oleaje, irradiación solar, eólica y geotérmica prestan variaciones que afectan el abastecimiento continuo de la demanda eléctrica; por ende, requieren sistemas robustos de almacenamiento de energía. Tal que complican la integración de la energía producida a la red eléctrica y elevan el nivel de complejidad de operación de los sistemas eléctricos.

Entre los procesos más destacados para producir energía eléctrica a partir del gradiente de salinidad se encuentran los siguientes: ósmosis retardada por presión (PRO, por sus siglas en inglés), Electrodiálisis inversa (RED, por sus siglas en inglés), Mezcla capacitiva (CAPMIX, por sus siglas en inglés), la Expansión de Hidrogel, Compresión de Vapor y Generación Hidrocrática [Straub, 2016]. Las tecnologías más desarrolladas hasta el momento para extraer energía del gradiente de salinidad están basadas en los procesos PRO y RED [Berry, 2015, Thorsen, 2009]. Este trabajo se relaciona con la producción de energía eléctrica a partir del proceso PRO.

En la desembocadura de un río, el agua dulce de éste se pone en contacto con el agua salada del océano, apareciendo un gradiente de salinidad debido a la diferencia de concentración salina entre el agua de río y de mar. El gradiente de

salinidad produce una diferencia de potencial químico que establece fuerzas moleculares que obligan a las moléculas del agua de río y de mar a mezclarse. En el proceso PRO la mezcla del agua de río y de mar se realiza de manera controlada a través de membranas semipermeables en módulos de mezclado, donde dicha diferencia de potencial químico y fuerzas moleculares se aprovechan para producir un caudal permeado presurizado durante el proceso de mezclado. El caudal permeado se utiliza como energía primaria del sistema de generación para producir energía eléctrica. Esta energía es renovable debido a que la mezcla del agua de los ríos y de los océanos es parte del ciclo natural del agua.

La eficiencia y viabilidad económica de las plantas de generación PRO depende en gran medida de las características de las membranas semipermeables de los módulos de mezclado. En la actualidad la tecnología ha tenido un avance significativo y se estima que se podrían lograr densidades de potencia superiores a 5 watt por metro cuadrado de membrana semipermeable [Thorsen, 2009]. En este sentido, las plantas de generación en base al proceso PRO, podrían resultar económicamente viables y podrían convertirse en una de las tecnologías más prometedoras para la generación de energía eléctrica a partir del gradiente de salinidad.

Para el consumo de la energía producida por las plantas PRO, la potencia generada se debe integrar a las redes de distribución de energía eléctrica. Sin embargo, su integración puede afectar y/o modificar la operación de dichas redes. Para cuantificar el impacto que dicha integración tiene en la operación de las redes de distribución se requiere primeramente evaluar la cantidad de potencia producida por las plantas de generación PRO. En relación a este aspecto, en la literatura se han reportado diferentes modelos que permiten estimar la densidad de potencia de la membrana semipermeable de los módulos de mezclado. En los modelos reportados dicha densidad de potencia se utiliza para calcular la potencia efectiva a la salida del módulo de mezclado. Esta potencia efectiva simplemente se multiplica por la eficiencia de los elementos transductores (por ejemplo de la turbina y generador eléctrico) para así evaluar la potencia eléctrica neta que sería producida por la planta de generación. Un compendio extenso de los modelos reportados hasta la

fecha puede encontrarse en [Touati, 2017] y [Achilli, 2016]. Todos estos modelos podrían considerarse principalmente útiles para el estudio de la viabilidad económica de la planta de generación PRO. Sin embargo, en el mejor conocimiento de los autores, hasta el momento no ha sido reportado en la literatura un modelo de las plantas PRO que pueda ser directamente incorporado en estrategias de análisis de redes de distribución para estimar el impacto de la integración de la potencia producida. Teniendo en mente lo anterior, este trabajo presenta un modelo unificado para evaluar la producción de energía eléctrica de una planta de generación en base al mecanismo PRO. En este modelo los transductores turbina y generador son representados explícitamente. Además, es formulado de tal forma que puede ser directamente incorporado en estrategias para el análisis de estado estacionario de redes de distribución de energía eléctrica. El modelo unificado presentado permite entonces evaluar la producción de potencia eléctrica con un enfoque hacia el análisis del impacto de la integración de plantas PRO en la operación de redes eléctricas de distribución. Éste trabajo se deriva de los objetivos en desarrollo de la Línea Transversal I-LT1: Tecnologías y Estrategias de Interconexión Eléctrica de Energías del Océano para el Mar Territorial Mexicano del CEMIE-O. El modelo presentado es susceptible de extenderse para incrementar la precisión de la evaluación de la producción de energía al considerar diferentes fenómenos que afectan el caudal permeado [Achilli, 2009], [Berry, 2015], [Maisonneuve, 2014], [Straub, 2016]. Este aspecto es de fundamental interés y se encuentra bajo desarrollo por parte de los proponentes de este trabajo.

## **2. Métodos**

### **Principio PRO para producción de energía eléctrica**

El proceso de ósmosis retardada por presión fue investigado por primera vez por Sydney Loeb en la Universidad de Ben-Gurion de Negev, Beersheba, Israel. Loeb describe el mecanismo y la viabilidad de la tecnología para la generación de energía eléctrica [Tran, 2015]. Este proceso se discute en base a figuras 1 y 2.

La figura 1 ilustra un módulo que almacena agua de mar (alta concentración salina  $C_m$ ) y agua de río (baja concentración salina  $C_r$ ) en dos compartimentos separados

por una membrana semipermeable; permeable al solvente (agua) pero impermeable al soluto (sal). Ambos compartimentos se encuentran a una misma presión (p.e. 1 atm). La diferencia de salinidad produce una diferencia de potencial químico  $\Delta P_{quim}$  entre ambas soluciones la cual provoca la tendencia del soluto y el solvente a disolverse uniformemente. El agua de mar ejercerá una presión osmótica  $\pi_m$  sobre el agua de río, mientras que el agua de río ejercerá una presión osmótica  $\pi_r$  sobre el agua de mar. Como  $\pi_m$  es mayor que  $\pi_r$ , el agua de río permeará al compartimento de agua salada debido al gradiente (diferencia) de la presión osmótica  $\Delta\pi$  entre ambas soluciones. Después de un intervalo de tiempo, se logra el equilibrio químico debido a que cierto volumen de agua de río habrá permeado al compartimento de agua salada (igual concentración salina en ambas soluciones). Por lo tanto, se tendrá un incremento de volumen en dicho compartimento, resultando una columna de presión de altura final  $z(\Delta\pi)$  función de la diferencia presión osmótica  $\Delta\pi$  (figura 2a). Este proceso es conocido como ósmosis hacia adelante (FO, por sus siglas en inglés). La diferencia de presión osmótica  $\Delta\pi$  se define como la presión necesaria en el compartimento de la solución de alta concentración salina para evitar el proceso de ósmosis.

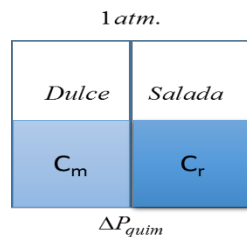
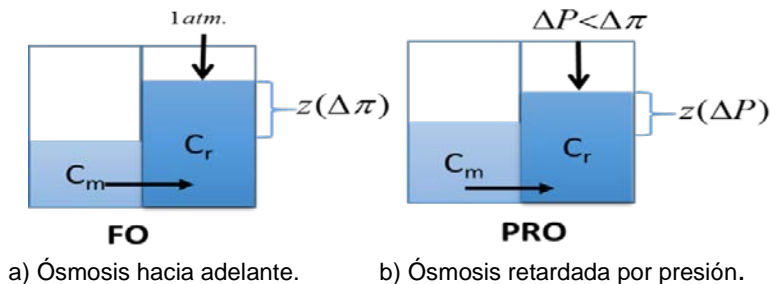


Figura 1 Proceso osmótico.



a) Ósmosis hacia adelante. b) Ósmosis retardada por presión.

Figura 2 Principios de ósmosis [Maisonneuve, 2014].

Suponga ahora que el proceso de ósmosis FO se altera al mantener una presión hidráulica (externa)  $\Delta P$  menor a la diferencia de presión osmótica (ver figura 2b) en el compartimento de la solución de alta concentración. El proceso de ósmosis será retardado, habrá flujo neto permeado de agua dulce al compartimento de agua salada y resultará una columna de presión de altura final  $z(\Delta P)$  menor a la producida en el proceso FO  $z(\Delta \pi)$ . En este caso no se logrará el equilibrio químico, por tanto, existirá energía potencial extraíble. Este proceso es conocido como ósmosis retardada por presión y es considerado en este trabajo.

Con el fin de aprovechar la energía del proceso PRO, el compartimento de alta concentración salina se adiciona con un sistema de bombeo para mantener la presión hidráulica  $\Delta P$ . De tal manera que el potencial químico asociado al gradiente de salinidad pueda producir un caudal permeado a través de la membrana a la presión hidráulica  $\Delta P$ . Esto da lugar al caudal presurizado requerido para impulsar el sistema de generación de energía eléctrica.

La eficiencia de generación se expresa normalmente en términos de la densidad de potencia. En este trabajo se consideran la densidad de potencia de la membrana y de la planta. Estas se definen como la potencia hidráulica a la salida del módulo de la membrana y la potencia eléctrica en las terminales del generador eléctrico por unidad de área de la membrana.

### **Modelo de la planta PRO**

Desde un punto de vista general la planta PRO contempla cuatro componentes fundamentales: entradas al módulo de membranas, módulo de membranas, salidas del módulo de membranas y generador eléctrico. Este último se conecta a la red de distribución de energía eléctrica, como se muestra en la figura 3. El principio básico de operación de la planta PRO para la producción de energía eléctrica es el siguiente. En las entradas del módulo de membrana se bombea el caudal de agua marina  $Q_{mar}$  y de río  $Q_{rio}$ . En el módulo de membranas ocurre el proceso PRO, lo que genera un caudal permeado presurizado  $Q_{permeado}$  de agua de río. Esto resulta en un caudal de agua salobre equivalente a la suma del caudal permeado y el caudal de agua de mar, i.e.,  $Q_{mar} + Q_{permeado}$ . De este caudal de agua salobre, la porción



equivalente al agua de mar  $Q_{mar}$  se desecha al mar. Es importante mencionar que el caudal de agua de río  $Q_{residual}$  que no permeó a través de la membrana es devuelto al río. Sin embargo, la porción del agua salobre equivalente al flujo permeado  $Q_{permeado}$  alimenta la turbina, la cual funciona como primomotor y produce un par mecánico  $P_{mec}$  que es entregado a la flecha del generador eléctrico. El generador eléctrico transforma el par mecánico en potencia eléctrica  $S_{elec}$ , la cual se integra a la red de distribución de energía eléctrica. Lográndose la producción de energía eléctrica por medio de la planta PRO.

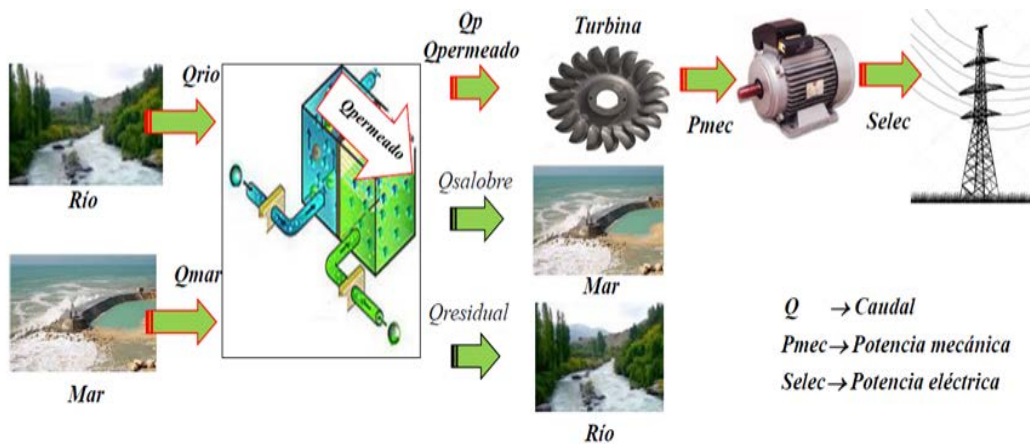


Figura 3 Diagrama esquemático de la planta PRO.

Con el fin de representar el proceso de producción de energía eléctrica antes descrito, en las siguientes secciones se describen los modelos matemáticos que representan los componentes principales de la planta PRO. Estos modelos dan lugar al modelo unificado de la planta PRO.

### Modelo del módulo de membranas

Para fines de determinar la potencia eléctrica producida por la planta PRO se requiere determinar el caudal permeado en los módulos de las membranas, como se describe a continuación. El caudal permeado  $Q_p$  (m<sup>3</sup>/s) en la membrana es función de la diferencia de presión osmótica entre los dos cuerpos de agua de diferente concentración salina. Las ecuaciones 1 y 2 permiten evaluar la presión osmótica en el cuerpo de agua de río y de mar, respectivamente.

$$\pi_r = \frac{C_r RT i_r}{M} \quad (1)$$

$$\pi_m = \frac{C_m RT i_m}{M} \quad (2)$$

En estas ecuaciones los subíndices  $r$  y  $m$  denotan agua de río y agua de mar, respectivamente.  $\pi$  representa la presión osmótica en (kPa),  $C$  es la concentración salina en (g/l),  $R$  es la constante Universal de los gases 8.3144 ((l kPa)/(K.mol)).  $i$  es el Factor Van't Hoff; para agua de río ( $i_r$ ) tiene un valor de 1 y para agua de mar ( $i_m$ ) tiene un valor de 2.  $M$  es la masa molar del cloruro de sodio (NaCl) y tiene un valor de 58.4427 g/mol.

A partir de las ecuaciones 1 y 2 la diferencia de presión osmótica  $\Delta\pi$  en kpa se puede expresar como en la ecuación 3 [Berry, 2015, [Thorsen, 2009]. La presión que hace que el caudal de flujo permeado  $Q_p$  se transporte hacia la turbina se conoce como presión hidráulica  $\Delta P$ . La presión hidráulica máxima  $\Delta P_{max}$ , y por ende el mayor rendimiento del proceso PRO, se alcanza cuando la presión hidráulica es la mitad de la diferencia presión osmótica. Esto se representa por medio de ecuación 4. Finalmente, el total del caudal permeado  $Q_p$  que llega hasta la turbina depende principalmente del área de la membrana  $A_{mem}$ , número de módulos de membranas  $N_{mod}$  y la velocidad del flujo permeado  $J_w$ , como es dado por la ecuación 5. La velocidad del flujo  $J_w$  está dada por la ecuación 6, donde  $A$  representa el coeficiente de permeabilidad del agua ( $m^3/(Pa.s.m^2)$ ) [Achilli,2009, Berry, 2015, Gerstandt, 2008, Maisonneuve, 2014, Tran, 2015]

$$\Delta\pi = \pi_m - \pi_r \quad (3)$$

$$\Delta P_{max} = \frac{\Delta\pi}{2} \quad (4)$$

$$Q_p = J_w A_{mem} N_{mod} \quad (5)$$

$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P_{max}) \quad (6)$$

### Modelo de la turbina

La potencia mecánica en watts a la salida de la turbina  $P_{tur}$  se puede evaluar a partir de la ecuación 7. Donde  $\eta_t$  es la eficiencia de la turbina.  $Q_p$  es el caudal

permeado con velocidad  $J_w$  y  $\Delta P_{max}$  es la presión hidráulica máxima, estos son evaluados a partir de las ecuaciones 4, 5 [Berry, 2015].

$$P_{tur} = \eta_t \Delta P_{max} Q_p \quad (7)$$

### Modelo del generador eléctrico

A partir de la revisión bibliográfica no se identificó algún tipo específico de generador eléctrico idóneo para plantas de generación en base a PRO. Por lo anterior y tomando en cuenta su gran aplicación para fuentes de energía renovable, se propone aquí utilizar como generador eléctrico una máquina de inducción tipo jaula de ardilla trifásica. Esta máquina permite su directa conexión a la red eléctrica. Aunque es importante mencionar que otro tipo de generadores y modos de conexión (p.e. a través de convertidores conmutados) podrían ser considerados. El diagrama esquemático de dicha máquina se muestra en la figura 4.

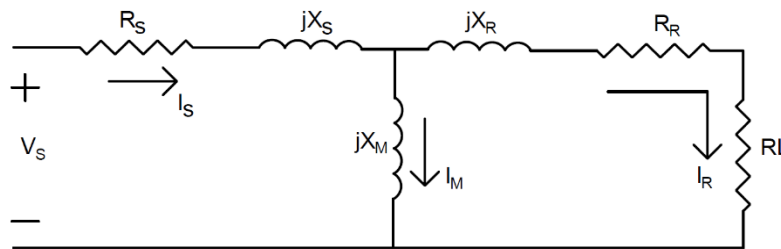


Figura 4 Diagrama esquemático de la máquina de inducción [Kersting, 2002].

Primeramente, se establece que la potencia mecánica que recibe la flecha del generador es igual a la potencia de salida de la turbina dada por la ecuación 7, como es denotado por la ecuación 8.

$$P_{mec} = P_{tur} \quad (8)$$

La potencia  $P_{mec}$  en el eje en el generador de inducción se transforma a potencia eléctrica en el rotor y se representa por  $PR$ . Esta potencia  $PR$  está dada por la potencia que se transfiere al estator a través del entrehierro y la potencia que se consume en pérdidas en el mismo rotor, como es dado por la ecuación 9. Donde  $s_1$  y  $s_2$  representan el deslizamiento de secuencia positiva y negativa,

respectivamente. Las corrientes fasoriales de secuencia positiva y negativa en el rotor están representadas por  $I_R^1$  y  $I_R^2$  en amperes, respectivamente.  $R_r$  representa la resistencia del rotor en ohms [Tran, 2015]. Además, el balance entre la potencia mecánica en la flecha del generador y la potencia en el rotor es una condición que se debe satisfacer incondicionalmente y se expresa en la ecuación 10.

$$P_R = 3|I_R^1|^2 \left( \frac{1-s_1}{s_1} \right) R_R + 3|I_R^2|^2 \left( \frac{1-s_2}{s_2} \right) R_R \quad (9)$$

$$\Delta P_{ind} = P_{mec} - P_r = 0 \quad (10)$$

En la ecuación 9 las corrientes de secuencia positiva  $I_R^1$  y  $I_R^2$  negativa del rotor se calculan por medio de la ecuación 11.

$$I_R^1 = \frac{jX_M}{j(X_R + X_M) + R_R/s_1} I_S^1; \quad I_R^2 = \frac{jX_M}{j(X_R + X_M) + R_R/s_2} I_S^2 \quad (11)$$

Donde  $X_M$  y  $X_R$  son las reactancias de magnetización y del rotor en ohms, respectivamente.  $I_S^1$  e  $I_S^2$  representan las corrientes fasoriales de secuencia positiva y negativa en amperes en las terminales del estator de la máquina, dadas por ecuaciones 12a y 12b.

$$I_S^1 = \frac{V_S^1 [j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_1}]}{jX_M \left( jX_R + \frac{R_R}{s_1} \right) + (R_S + jX_S) \left[ j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_1} \right]} \quad (12a)$$

$$I_S^2 = \frac{V_S^2 [j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_2}]}{jX_M \left( jX_R + \frac{R_R}{s_2} \right) + (R_S + jX_S) \left[ j(X_R + X_M) + \frac{R_R}{s_2} \right]} \quad (12b)$$

Donde  $R_S$  y  $X_S$  representan la resistencia y reactancia del estator, mientras que  $V_S^1$  y  $V_S^2$  representan los voltajes fasoriales de secuencia positiva y negativa en las terminales de la máquina, respectivamente. Estos voltajes se obtienen a partir de los voltajes de línea a neutro  $V_{abc}^{LN}$  en las terminales de la máquina, los cuales se pueden considerar como conocidos. Note que en las ecuaciones 9-12 no se han considerado cantidades de secuencia cero, esto se debe a que se considera que los devanados del estator de la máquina de inducción están conectados en delta o

en estrella con neutro flotante. Estos tipos de conexión son típicos e implican que no existen corrientes de secuencia cero. Las corrientes fasoriales  $I_{abc}$  en amperes en las terminales de la máquina en el dominio de las fases se pueden evaluar a partir de la ecuación 13, donde  $A_s$  es la matriz de transformación de componentes simétricas.

$$I_{abc} = A_s [0 \quad I_s^1 \quad I_s^2]^T \quad (13)$$

Finalmente, la potencia eléctrica producida en las terminales del generador se puede evaluar de la ecuación 14.

$$S_{ele}^{abc} = V_{abc}^{LN} I_{abc}^* \quad (14)$$

Donde  $S_{ele}^{abc}$  es la potencia compleja en volts-ampere. Se hace notar que el modelo unificado para cuantificar la potencia eléctrica generada por la planta de generación PRO a partir de la diferencia de concentración salina entre el agua de mar y de río está entonces dado por las ecuaciones 1 a la 14.

### **3. Resultados**

El modelo 1-14 se utiliza en esta sección para evaluar la potencia eléctrica producida a partir del gradiente de salinidad. Para este fin, se considera una planta de generación de capacidad nominal de 7.5 kW, la cual puede ser producida a través 80 módulos de membranas planas con densidad de potencia máxima de 4.1 w/m<sup>2</sup>. En este caso se adoptó una turbina Pelton con eficiencia de  $\eta_t = 0.85$ . El generador eléctrico es una máquina de inducción trifásica jaula de ardilla conectada en estrella con neutro flotante, de 6 polos, con capacidad de 7.5 kW y opera a 220 V y una frecuencia de 60 hz. Los parámetros de las membranas y del generador de inducción son proporcionados en la tabla 1.

Para la evaluación de la potencia eléctrica se abordaron los siguientes dos escenarios. En el escenario 1 se evalúa la potencia eléctrica producida al considerar que la planta está constituida por diferentes cantidades de módulos de membranas. Las diferentes cantidades de módulos producen una potencia hidráulica capaz de hacer operar el generador eléctrico desde un 10% a un 100% su capacidad nominal.

Tabla 1 Parámetros del generador y la membrana.

Membranas	Generador
$C_r = 0 \text{ g/l}$	$R_R = 0.144 \Omega$
$C_m = 35 \text{ g/l}$	$R_S = 0.294 \Omega$
$T = 293.15 \text{ }^\circ\text{K}$	$X_R = 0.209 \Omega$
$M = 58.44 \text{ g/mol}$	$X_S = 0.503 \Omega$
$R = 8.31 \text{ l.kPa/}^\circ\text{K.mol}$	$X_M = 13.25 \Omega$
$l_r = 1$	
$l_m = 2$	
$A = 1.87 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Pa s m}^2$	
$A_m = 28 \text{ m}^2$	
$N_{mod} = 80$	

Para este caso se ha tomado una concentración salina del agua de río y de mar de 0 g/l y 35 g/l, respectivamente. En el escenario 2 se evalúa la potencia eléctrica generada al variar el nivel de concentración salina del agua del río  $C_r$  y de mar  $C_m$  en valores que van de 0 a 10 g/l y 30 a 50 g/l, respectivamente. En este caso se considera que la planta está constituida por una cantidad fija de 80 módulos de membranas, los cuales son capaces de hacer operar el generador eléctrico al 100% de su capacidad nominal.

## 4. Discusión

### Escenario 1

La figura 5 muestra producción de potencia activa y reactiva en las terminales del generador para las diferentes cantidades de módulos y niveles de generación del generador eléctrico. Para la discusión de estos resultados se ha adoptado la convención pasiva, tal que valores negativos y positivos denotan potencia producida y consumida, respectivamente. Se puede observar que a mayor cantidad de módulos (y por ende mayor porcentaje del nivel de generación) la planta PRO incrementa la producción de potencia activa (útil o efectiva), pero requiere de un mayor consumo de potencia reactiva (no efectiva). En relación con la integración de plantas de generación PRO a las redes eléctricas, este resultado sugiere que a mayor nivel de generación de potencia activa por medio de este tipo de plantas se deben considerar estrategias y equipos adicionales para incrementar el soporte de potencia reactiva para compensar el inherente consumo de potencia reactiva.

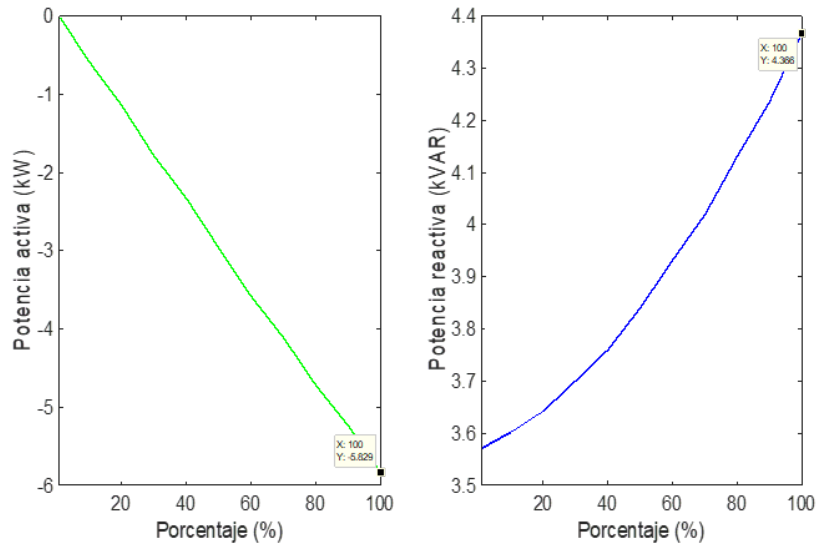


Figura 5 Potencia activa y reactiva en los diferentes niveles de generación.

## Escenario 2

La figura 6 muestra producción de potencia activa y reactiva en las terminales del generador para diferentes concentraciones de salinidad.

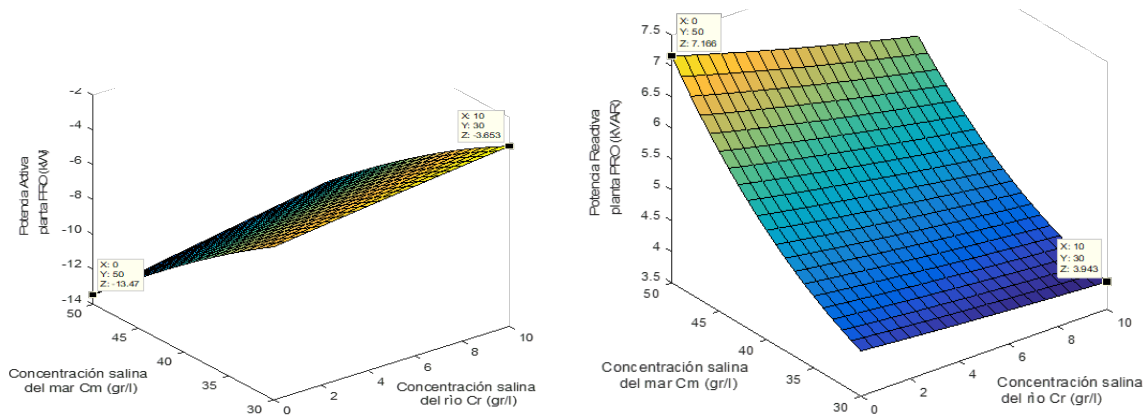


Figura 6 Potencia activa y reactiva para las diferentes concentraciones de salinidad.

Los resultados ilustrados en la figura 6 indican que la producción y el consumo de potencia activa y reactiva, respectivamente se incrementan conforme se incrementa la diferencia de salinidad entre el agua de río y agua de mar. En este caso la máxima producción de potencia activa es de 13.47 kW, mientras que el consumo máximo de potencia reactiva alcanza 7.16 kVAR. Superando entonces la capacidad nominal de la planta y del generador eléctrico (7.5 kW), la cual hipotéticamente se obtendría

con los 80 módulos de membrana. Estos valores máximos se obtienen cuando las concentraciones salinas del agua de río y de mar son  $C_r = 0$  g/lit y 50 g/lit, respectivamente. Este resultado sugiere que para la selección precisa de la capacidad de la planta PRO y en la planeación de la generación de energía eléctrica se debe tomar en cuenta la variación de la salinidad para diferentes estaciones del año y distintas zonas geográficas.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se presenta un modelo unificado básico para evaluar la generación de potencia compleja de una planta PRO. Los resultados obtenidos sugieren que la integración de estas plantas a las redes eléctricas para el consumo de la potencia activa producida deberá considerar aspectos relacionados con la compensación de potencia reactiva. Así mismo la precisa selección y diseño de la planta deberá considerar los posibles cambios de salinidad que ocurren en diferentes periodos estacionales y diferentes zonas geográficas. Es necesario extender el modelo para considerar aspectos que alteran la evaluación del caudal permeado. Además, es necesario modelar diferentes tipos de generadores eléctricos. Por último, para evaluar el impacto de la integración de la energía asociada a la planta PRO en la operación de las redes de distribución de energía eléctrica, se requiere que el modelo unificado sea incorporado en las estrategias de análisis de dichas redes. Estos aspectos se encuentran bajo desarrollo por parte de los autores de este trabajo y los resultados obtenidos serán sometidos a evaluación para su posible publicación.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Achilli Andrea, Cath Tzahi Y., Childress Amy E., Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation, *Journal of Membrane Science*, vol. 343, pp. 42-52, 2009.
- [2] Achilli A., Blandin G., Brogioli D., Chung T.-S., Cipollina A., D'Angelo A., Derese S., Galia A., Grasman S., Gurreri L., Han G., Hickenbottom K.L., Kumpavat K., Mantia F. La, Le Clech P., Li X., Micale G., Papapetrou M.,



- Pasta M., Piacentino A., Post J., Scialdone O., Tamburini A., Tedesco M., Vanoppen M., Veerman J., Verliefde A.R.D., Vermaas D.A., Wan C., Zhang S., Sustainable Energy from Salinity Gradients, Woodhead Publishing, 1st ed., 2016.
- [3] Berry A., Weinand D., Zenouzi M., Hennessy C., Mathieu J., Kowalski G., Pressure Retarded Osmosis: Laboratory Scale Design and Experiment. ASME, Energy Sustainability, vol. 2: pp.1-8, 2015.
- [4] CEMIE-O (2014), Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano: <http://cemieoceano.mx/>.
- [5] Gerstandt Karen, Peinemann K.-V., Skilhagen Stein Erik, Thorsen Thor, Holt Torleif, Membrane processes in energy supply for an osmotic power plant, Desalination, Volume 224, Issues 1–3, pp. 64-70, 2008.
- [6] Kersting William H., Distribution System Modeling and Analysis, CRC Press, 1st ed., 2002.
- [7] Maisonneuve Jonathan, Pillay P., Pressure-retarded osmotic power for remote communities in Quebec, IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-5, 2014.
- [8] Straub Anthony P., Deshmukh A., Elimelech M., Pressure-retarded osmosis for power generation from salinity gradients: is it viable? Energy & Environmental Science, Energy Environ. Sci., The Royal Society of Chemistry, vol. 9, pp. 31-48, 2016.
- [9] Thorsen T., Holt T., The potential for power production from salinity gradients by pressure retarded osmosis, Journal of Membrane Science, vol. 335, pp. 103-110, 2009
- [10] Tran Thomas T. D., Bianchi Carlo, Melville Joseph Edward Paul, Park Keunhan and Smith Amanda D., Design of housing and mesh spacer supports for salinity gradient hydroelectric power generation using pressure retarded osmosis, 2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech, 2015), pp. 141-147, 2015.
- [11] Touati Khaled, Tadeo Fernando, Ho Chat Sung, Ha Kim Joon, Alvarez-Silva Oscar, Pressure Retarded Osmosis, Academic Press, 1st ed., 2017.

# **APLICABILIDAD DE LA MANUFACTURA ESBELTA EN PROBLEMAS DE PRODUCCIÓN: EL CASO DE LA LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL DE LA UAM-AZC**

*APPLICABILITY OF LEAN MANUFACTURING IN PRODUCTION PROBLEMS: A CASE STUDY OF INDUSTRIAL ENGINEERING DEGREE IN THE UAM-AZC*

**Miguel Ángel López Ontiveros**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mlopez@correo.azc.uam.mx*

**Mariana Hernández González**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mhg@correo.azc.uam.mx*

**Lisaura Walkiria Rodríguez Alvarado**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*lwra@correo.azc.uam.mx*

**Jesús Loyo Quijada**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*lqj@correo.azc.uam.mx*

**Jesús Vicente González Sosa**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jvgs@azc.uam.mx*

## **Resumen**

El presente trabajo muestra a partir de la incorporación, en el 2013, de la materia de Sistemas de Manufactura Esbelta en el Plan de Estudios de la Licenciatura en Ingeniería Industrial de la Universidad Autónoma Metropolitana, los alumnos han aplicado esta filosofía para dar solución a problemas abordados en proyectos de fin de carrera, desarrollados en una empresa. En el estudio se analizan los proyectos tecnológicos, enfocados a detectar problemáticas y proponer métodos de solución. Parte del análisis se centra en el tipo y frecuencia de las problemáticas detectadas a lo largo del tiempo y los métodos que los alumnos proponen para su resolución, enfocados en la metodología de manufactura esbelta, entre las

técnicas más aplicadas por los alumnos están 5´S AMEF y Poka Yoke. Los resultados muestran que 5´S es la principal herramienta, esto indica que las empresas están en un estado inicial de implementación de la manufactura esbelta.

**Palabras clave:** Manufactura esbelta, proyecto tecnológico, 5´S.

## **Abstract**

The present work shows how the incorporation, in 2013, of the matter of Systems of Lean Manufacturing in the Plan of Studies of Industrial Engineering Degree of the Autonomous Metropolitan University, the students have applied this philosophy to give solution to problems addressed in the final year projects, developed in a company. In the study, the technological projects are analyzed, focused on detecting problems in companies and proposing solution methods. Part of the analysis focuses on the type and frequency of the problems detected over time and the methods that students propose for their resolution, focused on the lean manufacturing methodology, among the techniques most applied by students are 5' S, AMEF and Poka Yoke. The results show that the 5s is the main tool, which indicates that the companies are in an initial state for the implementation of lean manufacturing.

**Keywords:** lean manufacturing, technological project, 5´S.

## **1. Introducción**

La manufactura esbelta (ME) o lean manufacturing se puede definir como un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación de desperdicios, entendiendo como desperdicio o muda todas aquellas acciones que no aportan valor en un proceso, pero sí costo y trabajo; estos desperdicios se clasifican como: espera, defectos, movimientos innecesarios, exceso de inventario, sobreproducción, exceso de transporte y sobreprocesamiento [Weinstock, 2008]; [Cachon et. al; 2009], [Waring et. al; 2010].

Para eliminar todos los desperdicios, la manufactura esbelta contempla principalmente las siguientes herramientas [Rajadell *et. al;* 2010], [Succonini, 2013]:

- Value Stream Mapping (VSM): El VSM permite identificar las actividades que no aportan valor añadido al proceso.
- Metodología 5´S. La metodología 5´S permite lograr mejoras en la productividad del lugar de trabajo mediante la estandarización del orden y limpieza.
- Single Minute Exchange of Die (SMED). La técnica del SMED o cambio rápido de herramientas tiene como objetivo la reducción de tiempo de cambio de herramientas o moldes.
- Mantenimiento Productivo Total (TPM). El TPM asegura que los equipos de fabricación se encuentren en perfectas condiciones.
- Análisis de Modo y Efecto de Fallas (AMEF). El AMEF identifica fallas en productos y procesos y evaluar objetivamente sus efectos, causas y elementos de detección para evitar su ocurrencia y tener un método documentado de prevención.
- Poka Yoke. Los Poka Yoke son dispositivos desarrollados e implementados en los sistemas de fabricación para evitar errores humanos que pueden convertirse en defectos del producto.
- Six Sigma. Es una herramienta estadística de mejora que permite reducir drásticamente las variaciones en las especificaciones de un producto. La herramienta se aplica cuando los niveles de calidad no satisfacen al cliente y la variación existente obliga a mejorar los procesos de fabricación.
- Sistema Kanban. El Kanban es un sistema de gestión de la producción sincronizado, continuo que produce en lotes pequeños mediante la utilización tarjetas (Kanban) que indican la necesidad de producir en cada estación de trabajo.

Para explicar la forma en la cual el Sistema de Manufactura Esbelta y sus elementos interactúan y trabajan como un sistema completo, se presenta en la figura 1, una variante de la casa de producción Toyota.

El techo indica las metas que persigue la filosofía, dichas metas están soportadas por dos pilares: Justo a Tiempo que significa entregar el producto en la cantidad y

el momento adecuado y, el Jidoka, que significa entregarles a los operarios la capacidad de parar cuando se presenta un resultado negativo en las estaciones de trabajo, estos dos pilares están apoyados en los procesos estables y estandarizados, en una producción nivelada y en la mejora continua, todo lo anterior se construye a partir de la aplicación de las herramientas básicas: VSM, 5'S, SMED, TPM, KANBAN, Gestión Visual y KPI [Rajadell *et. al*; 2010], [Succonini, 2013].

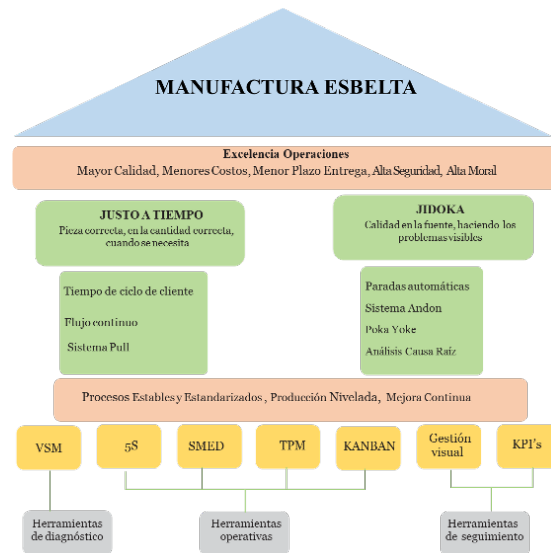


Figura 1 Casa de la manufactura esbelta.

Cada una de estas herramientas tiene una metodología propia, las herramientas como 5'S SMED, TPM, Poka Yoke y KANBAM son utilizadas para estabilizar los procesos de producción e incrementar el nivel de confianza con respecto a tiempos de preparación, efectividad global del equipo y niveles de calidad [Niño *et. al*; 2010].

En las empresas algunos de los síntomas más frecuentes que requieren de la implementación de los principios de la manufactura esbelta son: Tiempos muertos, procesos no estandarizados, baja capacidad de respuesta al cliente, calidad pobre, almacenes desordenados, baja productividad, paros por mantenimiento de equipos, mala actitud del personal, procesos lentos, altos costos de inversión y cero innovaciones [Urian, 2010].

La aplicación de los principios de la manufactura esbelta no es exclusiva en el sector productivo o manufacturero, se ha aplicado en el área de servicios y particularmente en hospitales con el objetivo de mejorar el servicio al cliente [Martínez *et. al*; 2016].

### **Importancia de la manufactura esbelta en la Ingeniería Industrial**

En el campo laboral, los Ingenieros industriales son los encargados de establecer la sostenibilidad de las organizaciones desde el punto de vista productivo, la ingeniería Industrial integra los sistemas en el área productiva o de servicios mediante el diseño, implementación, mejora y desarrollo de herramientas que garanticen el cumplimiento de metas y objetivos que contribuyan al mejoramiento de las condiciones y uso racional de los recursos en las organizaciones. En este sentido, el desarrollo del pensamiento *lean* en los ingenieros industriales garantiza el máximo aprovechamiento de los recursos al menor costo, logrando resultados más óptimos en un menor tiempo [Urian, 2010]. Los ingenieros industriales pueden aplicar esta metodología en cualquier empresa logrando ventajas competitivas en la rapidez de respuesta y reducción de costos. [Wilches *et. al*; 2013]. En la actualidad, la manufactura esbelta se ha convertido en una estrategia especialmente importante en empresas que han observado mejoras significativas en su aplicación [Arrieta *et al*; 2011], algunas de las razones claves son: permite competir efectivamente en una economía global, afronta la presión de los clientes en cuanto a la reducción de precios, permite una rápida adaptación a los cambios tecnológicos, ayuda en la adopción con mayor facilidad de estándares de calidad como la norma ISO 9001, y es definitiva a la hora de cumplir con las expectativas de los clientes [León *et al*; 2017].

### **Integración de manufactura esbelta en el plan de estudios de Ingeniería Industrial UAM-AZC**

A partir de la importancia que tienen los conceptos de manufactura esbelta, en el año 2013 se integró la Unidad de Enseñanza Aprendizaje (UEA) Sistemas de Manufactura Esbelta en el Plan de Estudios de la licenciatura e Ingeniería Industrial

de la UAM – AZC, la UEA se encuentra ubicada en el Área de Concentración de Producción y Manufactura y es una materia que los alumnos necesitan aprobar para la validación del Área Producción y Manufactura.

Los alumnos cursan Sistemas de Manufactura Esbelta en los últimos trimestres (10<sup>o</sup> u 11<sup>o</sup> trimestre) de la licenciatura, esto abre la posibilidad para que apliquen estos conceptos en la UEA Proyecto de Integración en Ingeniería Industrial I, dicha UEA tiene como objetivo general integrar conocimientos para resolver problemas relacionados con la licenciatura, se cursa en el 12<sup>o</sup> trimestre, se puede aprobar de manera individual o en equipo y contempla 18 horas practica a la semana, de esta manera los Proyectos de Integración desarrollados y presentados por los alumnos son fuentes importantes de información que nos indica la forma en la que se están resolviendo los problemas en la industria.

En este documento, nos centraremos en analizar un conjunto de Proyectos de Integración en Ingeniería Industrial, modalidad Proyecto Tecnológico, concluidos entre el 2009 y 2017, analizaremos las problemáticas abordadas y la forma en la que se resolvieron, centrando la atención en la aplicación de las herramientas de manufactura esbelta. La tabla 1 muestra el número de alumnos egresados del 2009 al 2017, los cuales desarrollaron su Proyecto de Integración.

Tabla 1 Alumnos egresados 2009-2017.

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Industrial	91	92	91	74	77	111	97	87	106	83

## **2. Metodología**

### **Etapas 1. Determinación de las áreas de impacto**

Se realizó una recopilación de información de la base de datos de los Proyectos de Integración en Ingeniería Industrial I, modalidad Proyecto Tecnológico, presentados y aprobados entre los trimestres 09-I y 17-P, (de enero del 2009 a julio de 2017) englobando así, un total de 26 trimestres. Con los proyectos presentados se obtuvo información referente a las características de las empresas donde se realizó el proyecto, los problemas detectados en las diferentes áreas de

impacto de la ingeniería industrial y el tipo de herramientas que el alumno recomienda para solucionar dichas problemáticas. El resultado de esta recopilación fueron 334 proyectos en 328 empresas, detectando 647 problemas. El número de proyectos es mayor que el número de empresas debido a que varios Proyecto de Integración se realizaron en la misma empresa. La tabla 2 muestra las áreas y los problemas que se encontraron en los proyectos.

Tabla 2 Áreas y problemas abordados en los Proyectos Tecnológicos.

ÁREAS	PROBLEMAS
<b>Administración de la producción</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Falta de planeación estratégica operativo y táctico</li><li>• Falta de base de datos de producto terminado o materiales</li><li>• Retrasos en las entregas</li><li>• Falta de políticas de inventarios</li><li>• Nivelación de las tasas de producción</li></ul>
<b>Calidad</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rechazos</li><li>• Certificación ISO</li><li>• Falta de medición de la calidad</li></ul>
<b>Estructura Organizacional</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Perfiles de puestos no definidos</li><li>• Organigrama mal definido</li><li>• Falta de políticas escritas</li></ul>
<b>Logística</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Falta de políticas de entrega</li></ul>
<b>Procedimientos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Procedimientos administrativos no documentados</li><li>• Procedimientos operativos no documentados</li></ul>
<b>Producción</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Procesos no estandarizados</li><li>• Generación de desperdicios</li><li>• Retrabajos</li><li>• Paros de equipo y maquinaria</li><li>• Mala distribución de planta</li></ul>
<b>Recursos Humanos</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Falta de capacitación</li><li>• Ausentismo</li><li>• Bajo rendimiento</li><li>• Alta rotación</li><li>• Falta de interés del trabajador</li></ul>
<b>Seguridad e Higiene</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Accidentes</li><li>• Instalaciones inseguras</li></ul>

## **Etapas 2. Determinación de las áreas de impacto donde intervienen la manufactura esbelta**

Posteriormente se realizó un filtro de los proyectos, eliminando aquellos en los cuales no se ha presentado como propuesta de solución una herramienta de manufactura esbelta. Este filtro permitió reducir la información a 290 empresas con 462 problemas detectados, que representan el 71% del total de proyectos, y se



eliminaron tres áreas de impacto, Estructura organizacional, Recursos Humanos y Logística. Con esta nueva base de datos se realizó un análisis sobre tres aspectos principales, todos ellos orientados a las herramientas de manufactura esbelta:

- La frecuencia con la que una herramienta fue propuesta para resolver un problema, sobre lo cual se efectuó un ordenamiento para posicionar las herramientas de mayor a menor frecuencia, considerando que la herramienta más utilizada para resolver un problema tiene la primera posición en importancia.
- La presencia de las herramientas a lo largo del periodo de estudio, considerando las modificaciones al Plan de Estudios de la Licenciatura, se buscó conocer en cuántos problemas se propuso utilizar alguna herramienta de manufactura esbelta y qué herramientas fueron, obteniendo también un ordenamiento de las herramientas según la frecuencia con la que se presentaron.
- El tipo de problemas que se resuelven con herramientas de manufactura esbelta y en qué proporción se emplea para cada problema.

Con esta información es posible determinar la aplicabilidad que los alumnos detectan para las herramientas de manufactura esbelta en los problemas que las empresas presentan.

### **3. Resultados**

La tabla 3 contiene las cinco áreas en las que se pueden aplicar herramientas de manufactura esbelta, para cada área se muestra el tipo de problemas que se presentaron y la cantidad de casos. Las áreas de Producción y Seguridad e Higiene engloban aproximadamente el 70% del total de casos distribuidos en 5 y 1 problemas respectivamente. En la tabla 3 se observa que el problema de distribución de planta ocupa el primer lugar con una representación del 40% y el problema de orden y limpieza en un segundo lugar con un 35%. La segunda área que presentó casos con el enfoque de solución desde la perspectiva de la metodología de ME, es seguridad e higiene con un 20%, en este caso se presentó

un único problema correspondiente a instalaciones inseguras. Las demás áreas de calidad, administración de la producción y procedimientos, están representados con un 14.5, 11.4 y 4.5% respectivamente.

Tabla 3 Casos encontrados para cada problema.

ÁREA	PROBLEMA	CASOS	%	TOTAL
PRODUCCIÓN	Mala distribución de planta	92	40.17	229 49.57 %
	Orden y limpieza	81	35.37	
	Procesos no estandarizados	45	19.65	
	Paros de equipo y maquinaria	11	4.80	
	Generación de desperdicios	10	4.36	
SEGURIDAD E HIGIENE	Instalaciones inseguras	92	100	92 19.91%
CALIDAD	Certificación ISO	27	40.29	67 14.51%
	Falta de medición de la calidad	25	37.31	
	Rechazos	15	22.38	
ADMINISTRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	Falta de políticas de inventarios	26	49.05	53 11.47%
	Falta de planeación estratégica operativo y táctico	17	32.05	
	Nivelación de las tasas de producción	10	18.83	
PROCEDIMIENTOS	Procedimientos ADMÓN. no documentados	21	100	21 4.54%
			<b>TOTAL</b>	<b>462</b>

En tabla 4 se pueden observar las herramientas de ME que se han empleado para la resolución de los diferentes problemas encontrados, estas herramientas se pueden ver en las celdas resaltadas, en las cuales también se muestra el porcentaje de casos en los que se empleó esa herramienta para resolver cada problema, registrando así la posición, del 1° al 10° lugar en el que se ubica cada herramienta según su frecuencia de uso.

Es evidente observar que se han aplicado 6 herramientas diferentes de ME en diversas áreas para resolver diferentes problemas. La herramienta de 5'S es la herramienta más utilizada para la solución de problemas, independientemente del área en el que este se presente. En el área de producción esta herramienta de 5'S ha tenido mayor presencia, ocupando entre el primer y tercer lugar de participación, mientras que para las demás áreas ocupa entre el cuarto y séptimo lugar.

Se puede considerar que la herramienta AMEF es la segunda más utilizada presente en cuatro áreas: producción, seguridad e higiene, calidad y administración de la producción. Es importante resaltar que, en el área de calidad es donde presenta su mayor porcentaje de participación con un 10% para resolver

problemas de falta de medición de la calidad, ocupando un tercer lugar y un 15% para analizar problemas de rechazos, ocupando un cuarto lugar.

Tabla 4 Porcentaje de uso de las herramientas de ME para cada problema.

ÁREA	PROBLEMA	IMPORTANCIA DE LA HERRAMIENTA									
		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°
PRODUCCIÓN	Generación de desperdicios	40%	5'S 30%	10%	10%	10%					
	Mala distribución de planta	66%	11%	5'S 10%	3%	2%	1%	1%	1%	1%	Andon 1%
	Orden y limpieza	5'S 87%	4%	2%	2%	1%	1%	1%	1%		
	Paros de equipo y maquinaria	62%	8%	AMEF 8%	8%	SMED 8%	8%				
	Procesos no estandarizados	47%	12%	10%	8%	6%	6%	5'S 4%	2%	2%	2%
SEGURIDAD E HIGIENE	Instalaciones inseguras	41%	27%	10%	6%	5'S 5%	4%	3%	1%	AMEF 1%	1%
CALIDAD	Certificación ISO	26%	26%	13%	11%	6%	6%	5'S 4%	4%	2%	2%
	Falta de medición de la calidad	48%	21%	AMEF 10%	7%	Ayudas visuales 3%	3%	3%	3%		
	Rechazos	25%	25%	PokaYoke 15%	AMEF 15%	5%	5%	5%	5%		
ADMINISTRACIÓN DE LA PRODUCCIÓN	Falta de planeación estratégica	15%	15%	12%	12%	12%	8%	4%	AMEF 4%	4%	4%
	Falta de políticas de inventarios	72%	9%	6%	3%	5'S 3%	3%	3%			
	Nivelación de las tasas de producción	29%	21%	14%	14%	7%	5'S 7%	7%			
PROCEDIMIENTOS	Procedimientos ADMIN no documentados	48%	17%	10%	5'S 7%	3%	3%	3%	3%	3%	

Con un menor porcentaje de participación y grado de importancia se presentan las herramientas de: Poka Yoke con un 15% ocupando un tercer lugar para resolver problemas de rechazo en el área de calidad. En un quinto lugar se presenta la herramienta SMED con un 8% para resolver paros de equipo y maquinaria en el área de producción. Ocupando esa misma posición, pero con un 3% de representación se encuentra la herramienta de Ayudas Visuales para resolver problemas de falta de medición de la calidad. Nuevamente se repite en el área de producción, pero enfocado al problema de mala distribución de planta la herramienta Andon con un 1%, ocupando el décimo lugar.

La tabla 5 incluye únicamente las herramientas de ME que se han empleado en los proyectos de integración, la información se muestra por año, partiendo del 2009 y terminando en el 2017; para cada año se presenta qué herramientas se emplearon, en qué posición se encuentra esa herramienta según su frecuencia de uso y qué porcentaje de los problemas fueron abordados con ella.

Tabla 5 Porcentaje anual de casos abordados con cada herramienta entre 2009 y 2017.

		FRECUENCIA DE USO									
		TOTAL	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
*Herramienta *Posición *Porcentaje de casos aplicados	Herramienta	5'S									
	1°	2°	1°	5°	6°	1°	1°	1°	1°	1°	
	18%	14%	17%	9%	6%	17%	27%	20%	22%	22%	
	AMEF										
	18°			12°				12°	8°	10°	
	1%			3%				2%	3%	3%	
	Poka Yoke										
	25°					25°		19°	16°		
	1%					1%		1%	1%		
	Ayudas visuales										
	26°					27°		13°			
	1%					1%		1%			
	Andon										
	31°						17°				
	0.2%						1%				
	SMED										
	32°						19°				
	0.2%						1%				

Esto se puede entender como una línea de tiempo en la cual se observa que a partir del año 2013 aparece la aplicación de 4 herramientas más de ME, correspondientes a Poka Yoke, Ayudas Visuales, Andón y SMED; lo cual responde a la incorporación de la UEA optativa de ME, para ese mismo año.

De igual manera, las herramientas de Poka Yoke y ayudas visuales, mejoran su posición a lo largo del tiempo, pasando de la posición 25 a la 16 y de la posición 27 a la 13, respectivamente. En el caso de la herramienta Andon y SMED ocupan la posición 17 y 19 respectivamente y no hay parámetro comparativo ya que en el año 2014 fue la primera aparición de estas herramientas para la solución de problemas. En el caso de la herramienta AMEF su primera aparición fue en el año 2011 y luego reaparece en el 2015 ocupando en ambos casos la doceava posición, en el año 2016 se posiciona en el octavo lugar, para decaer dos lugares en el año 2017. A pesar de esto, su aparición en la solución de problemas ha sido constante a partir del año 2015.

La figura 2 está enfocada a la herramienta de 5'S, en esta se muestran los problemas que fueron atendidos con esa herramienta, así como su porcentaje, resaltando que el 72% de los casos se trataron del problema Orden y limpieza seguido de Distribución de Planta con un 12%. Esto tiene correlación en la

frecuencia de aparición e importancia de uso de esta herramienta ya que todo indica que dicha herramienta ha sido usada ampliamente para dar solución a un problema de índole básica e indispensable para el adecuado funcionamiento de cualquier empresa.

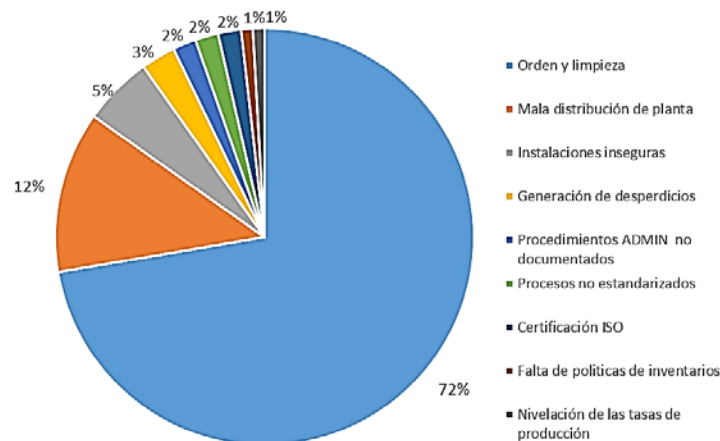


Figura 2 Porcentaje de problemas abordados con 5´S.

#### 4. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que Producción representa un área de oportunidad importante para la implementación de los elementos de la ME y que la mayoría de los problemas presentados responden a requerimientos básicos dentro de una organización como es el de asegurar un adecuado flujo productivo de material e información.

Respecto a las herramientas propuestas, se pone en evidencia que la más utilizada en la mayoría de los casos, independientemente del área de aplicación son las 5´S. Esto muestra la versatilidad de su aplicación, que, al ser muy amplia, puede ser usada desde diferentes enfoques.

Cabe mencionar que la metodología 5´S, es una técnica muy útil y beneficiosa en la organización industrial, mediante su implementación se puede mejorar la calidad, la productividad y la eficiencia de la organización, también tiene un efecto positivo en el rendimiento general [Shaikh; 2015]

A lo largo de los años que conforman este estudio, se observa que la metodología de 5´S se posiciona en primer lugar, es decir que se ha convertido en una

herramienta de primera necesidad para responder a problemáticas en una empresa, esto se debe a que las 5'S es una metodología que estandariza e implementa series sencillas de orden y limpieza en los puestos de trabajo eliminando las mudas, haciendo de ella la puerta de entrada a las otras herramientas, generando motivación a los empleados al ver cambios positivos en la implementación [Manzano *et. al*; 2016]

Esto parece indicar que en las empresas se trata de emplear estas técnicas en busca de la mejora continua, pero se observa que carecen de las condiciones mínimas para su implementación, como es un programa de limpieza, estandarización de sus procesos y el resguardo adecuado del inventario y material utilizado en su proceso.

En lo que respecta al porcentaje de los problemas que fueron resueltos con estas herramientas, se muestra un comportamiento ascendente o constante en algunos casos. Esto demuestra que la presencia de estas tiende al alza, y hay muchas posibilidades de que éstas se conviertan en las primeras opciones para solucionar problemas en las diferentes áreas. Ante estos resultados se puede inferir que el contenido abordado en dicha UEA impacta en el conocimiento previo de los alumnos para dar solución a una problemática con herramientas enfocadas a la mejorada continua.

## **5. Conclusiones**

La incorporación de la UEA de Manufactura Esbelta ha contribuido a la aportación de conocimiento de nuevas técnicas e instrumentos de mejora continua, esto ha permitido que su aplicación sea cada vez más frecuente para solucionar problemas que anteriormente se venían analizando con aspectos tradicionales.

La constante aplicación de la técnica de 5'S, pone en evidencia que las empresas bajo estudio, independientemente de sus características, presentan problemas básicos como es el de orden y limpieza. Esto indica que a pesar de que hay elementos dentro de la filosofía de manufactura esbelta que garantizan una mejora continua en los procesos productivos, no se está aprovechando en su totalidad la ventaja competitiva que éstas ofrecen. Los estudiantes están aplicando las

herramientas cada vez más, pero de una manera aislada y no en conjunto como un ciclo de mejora.

Un elemento para considerar es que Sistemas de Manufactura Esbelta, UEA en la que se abordan los elementos y herramientas de ME, es una materia optativa, por lo que no todos los estudiantes de la licenciatura la cursan y al tratarse de la única materia en la que se ponen en práctica estos aspectos, un significativo porcentaje de alumnos egresan sin conocerlos.

La necesidad de incluir en la formación del ingeniero industrial herramientas de ME se evidencia ante los requerimientos crecientes de las empresas como la necesidad de implementar sistemas de control económicos y fáciles de utilizar y por otro lado para dar solución a las exigencias que el mercado internacional impone, como la certificación bajo normas ISO, en las cuales se encuentra un área de oportunidad al momento de realizar un análisis de riesgos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Arrieta, J. Muñoz, J. Salcedo, A. Sosa, S. Aplicación lean manufacturing en la industria colombiana. Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development, August 3-5, 2011, Medellin, Colombia, 1-11. 2011.
- [2] Cachon, G. Terwiesch, C. Matching Supply and Demand. International Edition. Singapore: McGraw-Hill. 2009
- [3] León, G. E. Marulanda, N; González, H. Factores claves de éxito en la implementación de lean manufacturing en algunas empresas con sede en Colombia. Revista de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad de Nariño Vol. XVIII. No. Páginas 85-100.2017
- [4] Manzano, M. Gisbert, V. Lean Manufacturing: implantación 5'S. 3C Tecnología: glosas de innovación aplicadas a la pyme, Vol 5, No 4, 16-26. DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2016.v5n4e20.16-26>. 2016.
- [5] Martínez, P. Martínez, J. Nuño, P. Cavazos, J. Mejora en el tiempo de atención al paciente en una unidad de urgencias gineco-obstétricas mediante

- la aplicación de Lean Manufacturing. Revista Lasallista de Investigación - Vol. 13 No. 2 46- 56, julio-diciembre 2016.
- [6] Niño, L. Bednarek, M. Metodología para implantar el sistema de manufactura esbelta en PyMES Industriales mexicanos, Ideas CONCYTEG, 5(65), pp. 1284-1307. 2010
- [7] Rajadell, M. Sánchez, J. Lean Manufacturing. La evidencia de una necesidad. España: Editorial Díaz de Santos. 2010.
- [8] Shaikh, S. Alam, A. Ahmed, K. Ishtiyak, S. Hasan, S. Review of 5'S Technique. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 4(4), 927-931.2015
- [9] Socconini, L. Lean Manufacturing. Grupo Editorial Norma. 2013
- [10] Urián, T. Aprendizajes de manufactura esbelta para futuros ingenieros industriales. 15 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. Bogotá Colombia. 2010
- [11] Waring, J. Bishop, S. Lean healthcare: Rhetoric, ritual and resistance. Social Science & Medicine, 71(7), 1332-1340. 2010
- [12] Weinstock, D. Lean healthcare. The Journal of Medical Practice Management, 23(6), 339-41.2008.
- [13] Wilches, M. J. Cabarcas, J. C. Lucuara, J. González, R. Aplicación de herramientas de manufactura esbelta para el mejoramiento de la cadena de valor de una línea de producción de sillas para oficina. Revista Dimensión Empresarial, vol. 11, Núm. 1, pp. 126-136. 2013.



# **ANÁLISIS Y VISUALIZACIÓN DEL DISCURSO POLÍTICO EN TWITTER DE LOS CANDIDATOS A LA PRESIDENCIA DE MÉXICO**

*ANALYSIS AND VISUALIZATION OF THE POLITICAL DISCOURSE  
IN TWITTER OF THE CANDIDATES TO THE PRESIDENCY OF  
MEXICO*

***Erick López Ornelas***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*elopez@correo.cua.uam.mx*

***Rocío Abascal Mena***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mabascal@correo.cua.uam.mx*

## **Resumen**

El discurso político en redes sociales ha reavivado la controversia en torno a las transformaciones que estas nuevas prácticas discursivas introducen en las formas de hacer política. En esta controversia, se enmarca la pregunta acerca de cómo utilizan los candidatos políticos las redes sociales y sobre todo cuáles son los mensajes principales que desean comunicar en Twitter. En este estudio, se aborda un corpus de tuis del inicio de campaña de los tres candidatos que están peleando la presidencia de México 2018 (@RicardoAnayaC, @JoseAMeadeK, @lopezobrador\_) a fin de conocer la congruencia del discurso presentado en las redes sociales. Este estudio discursivo está basado en el análisis de redes sociales para visualizar y detectar elementos importantes en el discurso digital en Twitter de los tres candidatos.

**Palabras Claves:** Análisis de discurso, análisis de redes sociales, procesamiento de lenguaje natural.

## **Abstract**

*The political discourse in social networks has revived the controversy about the transformations that these new discursive practices introduce in the ways of doing*

*politics. In this controversy, the question is framed about how political candidates use social networks and especially what are the main messages they want to communicate on Twitter. In this study, we use a corpus using Twiter from the beginning of the campaign of the three candidates who are fighting for the presidency of Mexico 2018 (@RicardoAnayaC, @JoseAMeadeK, @lopezobrador\_). This study is conducted in order to know the congruence of the discourse presented on social networks. This discursive study is based on social networks analysis to visualize and detect important elements in the digital discourse on Twitter of the three candidates.*

**Keywords:** *Discourse analysis, natural language processing, social network analysis.*

## **1. Introducción**

Hasta hace pocos años, los discursos de los políticos han experimentado una nueva forma de mediatización: su producción y difusión en las redes sociales. En este contexto, se ha destacado el uso de la red social Twitter [Sarlo, 2011], [Graham, 2013] cuyas características; tales como la economía de recursos; la posibilidad de articular mensajes simples y complejos en los que se combinan textos, imágenes, sonido, ligas y sus múltiples posibilidades; y la rapidez de publicación y actualización a través de dispositivos móviles; la han configurado como una de las redes sociales favoritas de los políticos [Delany, 2008].

Esta utilización de las redes sociales ha abierto un debate en torno a la mediatización y la nueva forma de hacer política. Por un lado, las redes sociales son vistas como una ampliación del espacio público [Castells, 2009] que permite que los ciudadanos participen activamente de la vida política del país y se comuniquen de manera directa con los candidatos. Por otro lado, se piensa que, mediante la utilización de las redes sociales, el discurso político pierde su tradicional carácter argumentativo [Graham, 2013].

En este artículo, se presentan los resultados de un análisis basado en las redes sociales sobre un corpus conformado por todos los mensajes (tuits) publicados, desde el inicio de las campañas presidenciales en México 2018 y hasta la fecha

de realización del análisis (entre el 30 de marzo y el 18 de abril del 2018), desde las cuentas oficiales de Twitter de los candidatos presidenciales. Los candidatos analizados son: (@RicardoAnayaC, @JoseAMeadeK, @lopezobrador\_) que representan las 3 fuerzas políticas principales en el país. Cabe mencionar que los candidatos independientes, debido a que se sumaron a destiempo a la campaña política, no fueron tomados en cuenta para este estudio. Este trabajo propone analizar los tuits realizados por los candidatos para conocer el discurso político en las redes sociales y cuál es su orientación, todo esto mediante el análisis de las redes sociales y su interpolación al análisis de conceptos relevantes en los tuits.

### **El discurso y su análisis**

El discurso es una creencia, una práctica o un conocimiento que construye realidad y proporciona una forma común de entender el mundo por los individuos, es el lenguaje en uso y sus efectos en los distintos contextos sociales. Hay varios autores que buscan su entendimiento, y se refieren al discurso como al conjunto de prácticas lingüísticas que mantienen y promueven ciertas relaciones sociales. En [Mills, 2009], se analizan los significados de discurso en varias definiciones existentes (desde las ópticas lingüísticas, teoría cultural, y psicología social) y sintetiza a los discursos como un sistema de lenguajes que tienen algún efecto en el mundo real. De este modo Twitter es un ejemplo claro en el que se puede generar un discurso el cual, al tener una interacción social importante con el mundo real, es susceptible de ser estudiado y analizado para conocer sobre todo su carácter argumentativo.

Por otro lado, la disponibilidad de métodos confiables y eficientes para la colección y el análisis de los datos proveniente de las redes sociales es una preocupación creciente para las empresas y formuladores de políticas [Chamlertwat, 2012].

Twitter nace con la idea de brindar a las personas una herramienta más simple para responder a la pregunta: ¿qué estás haciendo ahora? Últimamente, ha evolucionado en un espacio público en el que las personas transmiten sus opiniones o lo que creen que es importante para su público. El enfoque más comúnmente utilizado para su estudio es la minería de datos [Wan-Shiou, 2006] y

los métodos basados en el análisis semántico como análisis de sentimiento y reputación o extracción de texto a través de algoritmos de procesamiento del lenguaje natural [Zafarani, 2014]. Estos métodos se basan en la extracción automática de significado y sentimiento de los mensajes que se intercambian en una red [Brown, 2012]. También existen métodos estadísticos para extraer ideas del texto [Kumar, 2006]. Por ejemplo, frecuencia ponderación es una técnica popular utilizada para extraer términos importantes de un corpus de documentos según su relevancia [Mills, 2009]. Adicionalmente existen los métodos basados en el análisis de sentimientos, que se aplican para identificar y evaluar automáticamente juicios de valor expresados por los usuarios al interactuar con las redes sociales sobre un objeto específico [Chamlertwat, 2012], [Criado, 2018], [Stewart, 2018].

## **2. Métodos**

### **Extracción de información**

El primer paso es poder realizar la extracción de información. El API de Twitter permite a los desarrolladores tener acceso a algunos de sus datos. En este proyecto, usamos la API de búsqueda. Como su nombre lo sugiere, el API de búsqueda se utiliza para realizar búsquedas específicas de tuits. Permite la búsqueda de información específica palabras, usuarios, fechas, etc. Sin embargo, tiene algunas limitaciones como el número de tuit a extraer de manera directa.

En nuestro caso hemos utilizado para la extracción de tuits y la construcción del corpus todas las publicaciones generadas por los tres principales candidatos a la presidencia de México. Hemos realizado la extracción a partir de la fecha de inicio formalmente las campañas electorales (30 de marzo del 2018) y antes de que se realizara el primer debate presidencial (22 de abril del 2018).

En esta primera extracción se obtuvieron un total de 46 tuits para @RicardoAnayaC, 44 tuits para @JoseAMeadeK y 23 tuits para @lopezobrador\_. Todos los tuits son originales y generados por los tres candidatos, no se tomaron en cuenta retuits o el análisis de imágenes o ligas asociadas a contenido específico. La tabla 1 muestra parte de esta extracción realizada.

Tabla 1 Autor y tuit publicado.

@lopezobrador_	Veán como cerramos la jornada el día de hoy en Ciudad Obregon, Sonora. Como lo repite aquí la gente "ahora sí" o como lo dice la canción de Amaury Pérez 'No lo van a impedir'.
@lopezobrador_	Estuvimos con los ocho gobernadores de los pueblos yaquis. Tomamos acuerdos como hermanos. Nos recibieron con música y nos despidieron con la 'Danza del Venado'.
@lopezobrador_	Miren como nos fue en Nogales. Como diría Juan Gabriel 'A mí me gusta mucho estar en la frontera'.
@lopezobrador_	La mafia del poder está al borde de un ataque de nervios, no les ha funcionado ni les funcionará la guerra sucia. Hagan lo que hagan no dejamos de crecer. Miren esta encuesta.
@lopezobrador_	Miren la participación de la gente en Ensenada. Si así está el norte, imaginen el sur. Esto explica el nerviosismo de los de la mafia del poder, su desesperada e inútil guerra sucia.
@JoseAMeadeK	#EnVivo. Emprendimiento: Factor de Desarrollo para el México de Hoy.
@JoseAMeadeK	Lo malo de hacer campaña a partir de aviones y aeropuertos, es que no le salga a uno el tren de aterrizaje de la congruencia y se mantenga volando en la densa hipocresía.
@JoseAMeadeK	Sigue mi participación en el Foro Candidatos MX Visión 18/24 en @EIFinanciero_Mx #EFDiálogoMeade
@JoseAMeadeK	Este es el acuerdo más importante para el futuro de nuestro país. Y es, además, un espacio de justicia elemental para poner fin a la profunda desigualdad en la que aún vivimos #PactoPrimerInfancia
@JoseAMeadeK	#LoDicho Para @lopezobrador_ su compromiso con la niñez es nulo. Pero con la #CNTE y Elba Esther todo es armonía. Ni con su vuelo privado llegó al #PactoPrimerInfancia #PusNoLlegué
@RicardoAnayaC	Arrancamos innovando, con un Hackaton de más de mil jóvenes haciendo propuestas. Los resultados fueron increíbles, esta generación está #DeFrenteAlFuturo.
@RicardoAnayaC	Me reuní con más de 10 mil personas en #Tijuana para hacer un compromiso: por ellos y por sus familias, vamos a bajar el IVA a la mitad en toda la zona fronteriza.
@RicardoAnayaC	Si el Nuevo Aeropuerto se construye de un modo razonable, transparente y se asocia al desarrollo del oriente de la CDMX, puede constituir el más importante motor de la inversión pública y privada del país. Garantizamos: inversión pública, inversión privada, inversión honesta.
@RicardoAnayaC	Como papás, sabemos que los primeros años son los más importantes para el desarrollo de los niños. Por eso, absolutamente convencido, firmé el #PactoPrimerInfancia, para que todos los niños tengan alimentación, salud y educación. Hagamos de #México el mejor lugar para nacer.
@RicardoAnayaC	Gracias a los integrantes del @ConsejoCC por este encuentro. Su trabajo para fomentar la participación social y promover las causas nacionales es muy importante para que México avance por buen rumbo. #DeFrenteAlFuturo

## Creación de unidades de discurso

Para el análisis y la visualización se generaron estructuras de red de discurso basadas en un gráfico bipartito de palabras por unidades de discurso. Para realizar el análisis, los datos del discurso original se transforman mediante;

- La fusión de formas de sustantivos en singular y plural.
- La fusión de diferentes palabras que tienen el mismo significado (por ejemplo, "Cd." y "Ciudad").
- La fusión de diferentes formas conjugadas de verbos si el usuario necesita analizarlos.
- La eliminación de unidades discursivas no relacionadas y fuera de contexto como ligas externas o imágenes.

Antes de realizar el análisis, se debe seleccionar una lista de palabras clave de acuerdo con los objetivos del analista, por ejemplo, palabras conceptuales relacionadas con el discurso político para examinar cómo los candidatos intentan pasar mensajes o emociones ligadas a sus propuestas y cuál es la imagen que quieren generar sobre su persona. En la figura 1 podemos observar este proceso donde tenemos la lista de palabras seleccionadas; lista de todas las palabras en orden descendente de frecuencia; y el discurso de entrada. En este momento, se puede especificar las unidades del discurso como oraciones, turnos de conversación u otros tamaños del discurso.

Word	Count	Name	Text
gente	50	1	vean como cerramos la jornada el día de hoy en ciudad obregon, sonora. como lo repite aqui la gente "ahora
ciudad	41	2	estuvimos con los ocho gobernadores de los pueblos yaquis. tomamos acuerdos como hermanos. nos
frontera	25	3	miren como nos fue en nogales. como diria juan gabriel 'a mí me gusta mucho estar en la frontera'.
maña	23	4	la maña del poder esta al borde de un ataque de nervios, no les ha funcionado ni les funcionara la guerra
poder	20	5	miren la participacion de la gente en ensenada. si así está el norte, imaginen el sur. esto explica el
presidente	20	6	tengo informacion de que los de la maña del poder mandan robar cañeras en nuestros eventos para despojar
méxico	14	7	iminen cuánta gente participó en el acto de tjuanal es impresionante el silencio y la forma como irrumpe la
respeto	12	8	la campaña la está haciendo el pueblo con su ingenio y alegría. terminamos la visita a los cabos, vamos a
militarización	11	9	al triunfar, desde el primero de julio hasta el primero de diciembre, en el periodo en que seré presidente electo,
alegría	11	10	si solo fuese por la voluntad de la gente podríamos decir 'este arroz ya se coció', pero debemos prepararnos
paz	9	11	seguimos recogiendo los sentimientos y la sabiduría de la gente. en la mañana estuvimos en tequila, jalisco, y
trump	8	12	el fallo del tepj a favor del candidato "independiente" tiene mucha miga, pero lo mejor de la farsa es ver a
doctrina	8	13	a 99 años del asesinato de zapata, recordamos su lucha y reafirmamos nuestros compromisos con indígenas
campaña	8	14	acompañamos a claudia sheinbaum en las delegaciones de azcapotzalco y miguel hidalgo. la gente en la
sucia	7	15	así como empezamos en ciudad Juárez, con mucha participación y alegría de la gente, terminamos la semana
conservadores	7	16	no es venganza, es justicia y austeridad republicana.
pueblo	5	17	terminamos la gira por la frontera, además de reafirmar nuestra postura con relación a estados unidos, dimos
guerra	5	18	desde 'mi malamoros querido', como cantaba rigo tovar, volvimos a pedirle, con urbanidad política, a donald
frontera	5	19	he tratado el tema sobre las amenazas del presidente trump y su memorándum para enviar a la guardia
nervios	4	20	no a la militarización de la frontera, ni al muro; sí al respeto mutuo y a la cooperación para el desarrollo.
política	4	21	la verdadera doctrina de los conservadores es la hipocresía. ahora que necesitan los votos hasta reniegan de
hipocresía	4	22	buscaremos una relación de amistad y de cooperación con el gobierno de estados unidos, con respeto a
lucha	3	23	
achiichines	3	24	
farsa	3	25	
compromisos	3	26	

Figura 1 Selección de conceptos, frecuencia de los conceptos y corpus original.

## Construcción de los grafos de conceptos

En términos de notación, el grafo generado a partir de los conceptos extraídos con mayor frecuencia emplea la notación gráfica típica  $G = (V, E)$ , donde  $G$  representa todo el grafo,  $V$  representa el conjunto de todos los vértices (en nuestro caso los conceptos) y  $E$  para el conjunto de todas las relaciones entre los conceptos. Para generar las unidades de discurso utilizamos un grafo bipartito [Zwaenepoel, 2017]. Un grafo bipartito es un grafo  $G=(V, E)$  donde los vértices  $V$  se pueden separar dos conjuntos disjuntos  $U$  y  $N$ , donde  $U \cup N = V$  y  $U \cap N = \emptyset$ . Tomando en cuenta este grafo bipartito podremos entonces, construir dos grafos. El primero será un grafo generado a partir de las palabras clave seleccionadas y cómo están relacionadas y el segundo será un grafo generado a partir de las unidades discursivas y cómo se relacionan entre ellas. En la figura 2 mostramos cómo este grafo bipartito es formado.

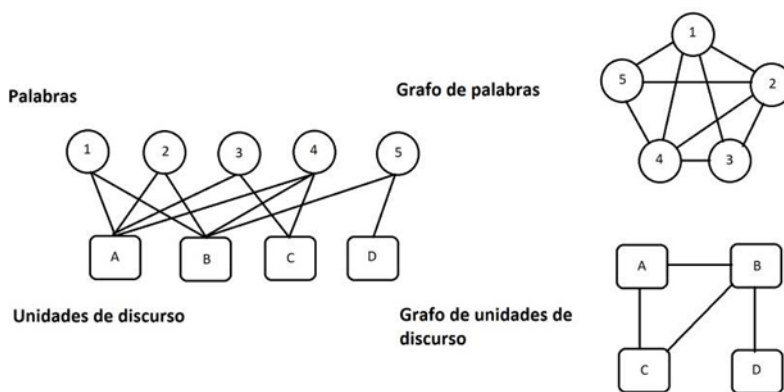


Figura 2 Grafo bipartito de palabras y unidades de discurso.

## Análisis de las características de la red basados en sus coeficientes

Durante este paso de unidades de discurso a grafos, podemos realizar un conjunto de cálculos que normalmente son utilizados en el Análisis de las Redes Sociales. Estos son los coeficientes de centralidad de intermediación, el coeficiente de centralidad de grado y el coeficiente de centralidad de proximidad.

En teoría de grafos y análisis de redes la centralidad en un grafo [Reinhard, 2017], se refiere a una medida posible de un vértice en dicho grafo, que determina su importancia relativa dentro de éste. La centralidad mide según un cierto criterio

la contribución de un nodo según su ubicación en la red, independientemente de si se esté evaluando su importancia, influencia, relevancia o prominencia.

La centralidad de intermediación es una medida que cuantifica la frecuencia o el número de veces que un nodo actúa como un puente a lo largo del camino más corto entre otros dos nodos. La idea intuitiva es que, si se eligen dos nodos al azar, y luego también al azar uno de los eventuales posibles caminos más cortos entre ellos, entonces los nodos con mayor intermediación serán aquellos que aparezcan con mayor probabilidad dentro de este camino.

Formalmente, la intermediación  $C_{BET}(i)$  de un nodo  $i$  en una red se define como en la ecuación 1.

$$C_{BET}(i) = \sum_{j,k} \frac{b_{jik}}{b_{jk}} \quad (1)$$

Donde  $b_{jk}$  es el número de caminos más cortos desde el nodo  $j$  hasta el nodo  $k$ , y  $b_{jik}$  el número de caminos más cortos desde  $j$  hasta  $k$  que pasan a través del nodo  $i$ . La centralidad de grado corresponde al número de enlaces que posee un nodo con los demás. Si se tiene la matriz de adyacencia del grafo, donde cada posición  $a_{ij}$  asume el valor 1, si existe la arista  $(i, j)$  y el valor 0, si no existe, entonces la centralidad de grado de cada nodo  $j$  se puede definir con ecuación 2.

$$C_{DEG}(j) = \sum_i a_{ij} \quad (2)$$

La centralidad por cercanía Se basa en calcular la suma o bien el promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás. Formalmente, la cercanía  $C_{CLO}(i)$  de un nodo  $i$  se define con ecuación 3.

$$C_{CLO}(i) = e_i^T S^{-1} \mathbf{1} = \sum_{j=1}^n S_{ij} \quad (3)$$

Donde  $S$  es la matriz de distancias de la red, es decir, aquella matriz cuyos elementos  $(i, j)$  corresponden a la distancia más corta desde el nodo  $i$  hasta el





El discurso utilizado por @RicardoAnayaC (figura 4), es más homogéneo y se centra en sus “propuestas”, y en las “oportunidades” en materia de “salud”, “desarrollo”, “inversión” que pueden generarse con su gobierno. Habla de “unidad”, “familia” y “futuro” en muchos de sus mensajes.



Figura 4 Nube de palabras usadas por @RicardoAnayaC.

El discurso utilizado por @JoseAMEadeK (figura 5), es un discurso enfocado en mencionar a “@lopezobrador\_” y lo toma como su elemento central en sus discursos, habla de “retroceso”, “delincuentes” y la “cnte”. También otros elementos son visibles como “competitividad”, “educación y “soberanía”.



Figura 5 Nube de palabras usadas por @JoseAMEadeK.

### **Análisis visual del grafo de palabras y unidades de discurso**

A partir de esta idea podemos entonces, construir el grafo de palabras y el grafo de unidades de discurso para cada uno de los discursos generados por los tres candidatos. En las siguientes figuras mostramos ambos grafos, el de frecuencia de palabras y el de unidades de discurso.

A partir de la información mostrada de los grafos algunos elementos se pueden evidenciar. En el grafo generado a partir de las interacciones de @lopezobrador\_

(figura 6), se puede apreciar una separación en dos segmentos de los grafos. El primero que habla de la “gente”, la “esperanza”, “ciudad” y “democracia” y el otro que está centrado en los problemas que tiene la “frontera” con el “muro” y “trump”. La interacción que se aprecia con el discurso de @RicardoAnayaC (figura 7), es más interesante ya que es mucho más homogénea y las palabras utilizadas están en la mayor parte de las unidades discursivas, no hay palabras sueltas y sin contexto, sino que todos los elementos están enfocados en valorizar sus propuestas.

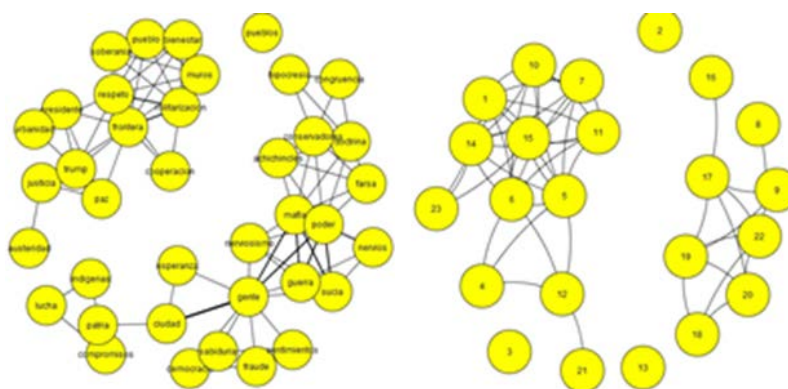


Figura 6 Grafos de palabras y unidades discurso para tuits publicados @lopezobrador\_.

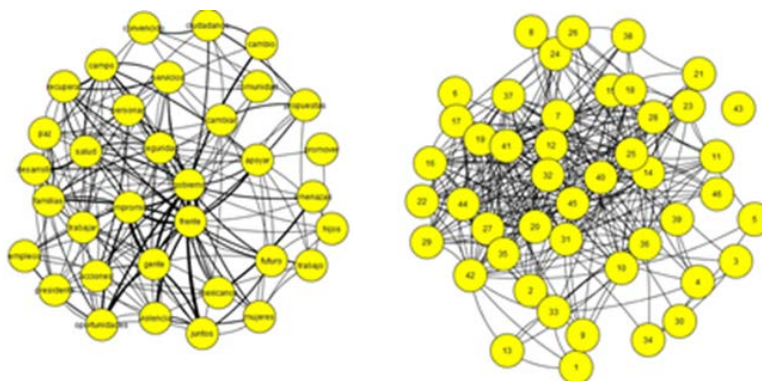


Figura 7 Grafos de palabras y unidades discurso para tuits publicados @RicardoAnayaC.

Finalmente, el candidato @JoseAMeadeK (figura 8), muestra una falta de cohesión en el grafo, existe una agrupación muy marcada donde menciona constantemente a @lopezobrador\_ y un conjunto de elementos aislados que no logran fusionarse de manera transparente con el resto de su discurso.

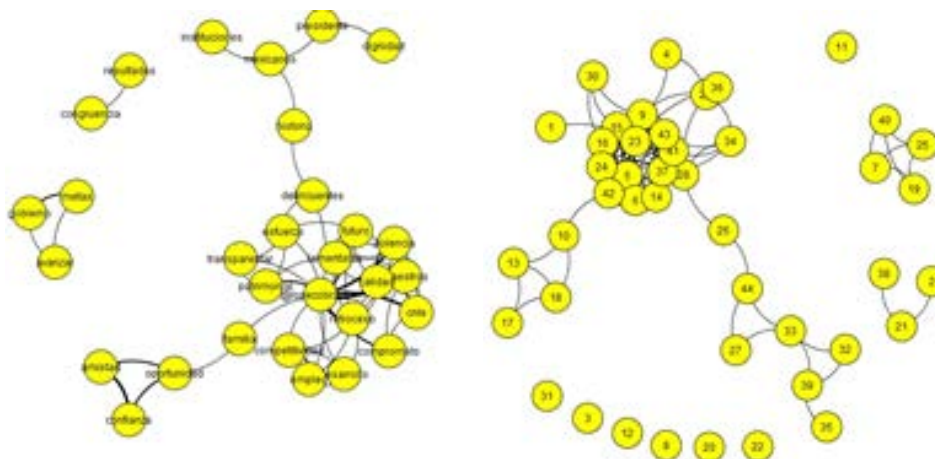


Figura 8 Grafos de palabras y unidades discurso para tuits publicados @JoseAMeadeK.

### **Análisis de coeficientes**

El análisis de coeficientes resulta muy importante para poder analizar las palabras no en términos de su frecuencia en el grafo, sino en su localización en el mismo. De esta forma podemos identificar palabras que son centrales en el discurso de cada uno de los candidatos. Hemos decidido de solo analizar la centralidad de las palabras por intermediación, ya que es un coeficiente que ayuda a identificar las palabras que sirven de puente o interconexión con otras unidades discursivas.

Las palabras que cuentan con una mayor centralidad de intermediación para el candidato @lopezobrador\_ (figura 9) son: “Gente”, “mafia”, “sucia”, “frontera”, “justicia”. Esto hace alusión a lo que el candidato le interesa posicionar en su discurso, la “gente” es la conexión principal de sus ideas y la mayoría de sus unidades de discurso giran en torno a este concepto. Otra palabra que también sirve fuertemente es la palabra “mafia”.

Las palabras que cuentan con una mayor centralidad de intermediación para el candidato @RicardoAnayaC (figura 10) son: “Salud”, “frente”, “gobierno”, “apoyar”, “trabajo”. Esto refleja que su orientación en su campaña política hasta el momento se centra en sus propuestas ya que sus palabras principales de conexión son “salud”, “apoyar” y trabajo. Otra palabra importante es “frente” y está ligada principalmente a su slogan principal de la campaña.

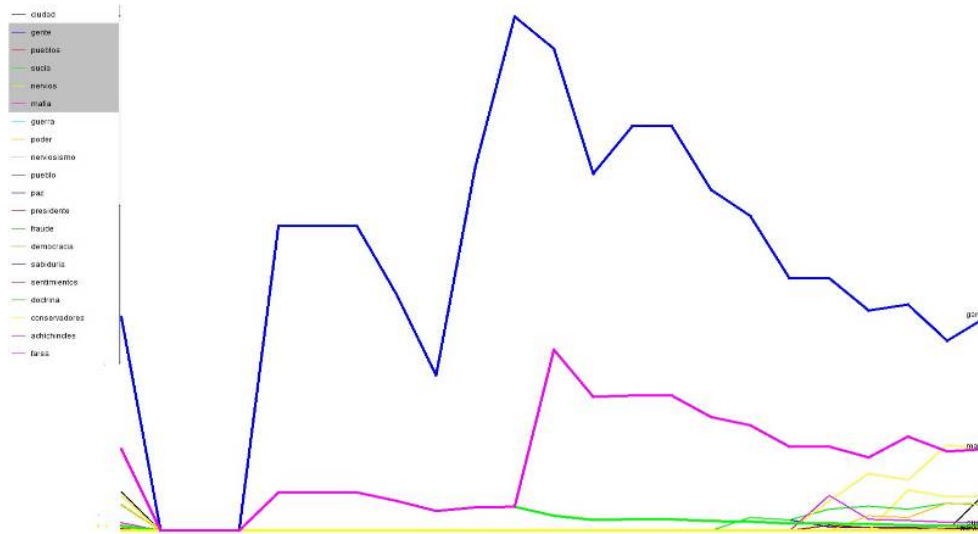


Figura 9 Análisis de centralidad por intermediación grafo de palabras @lopezobrador\_.

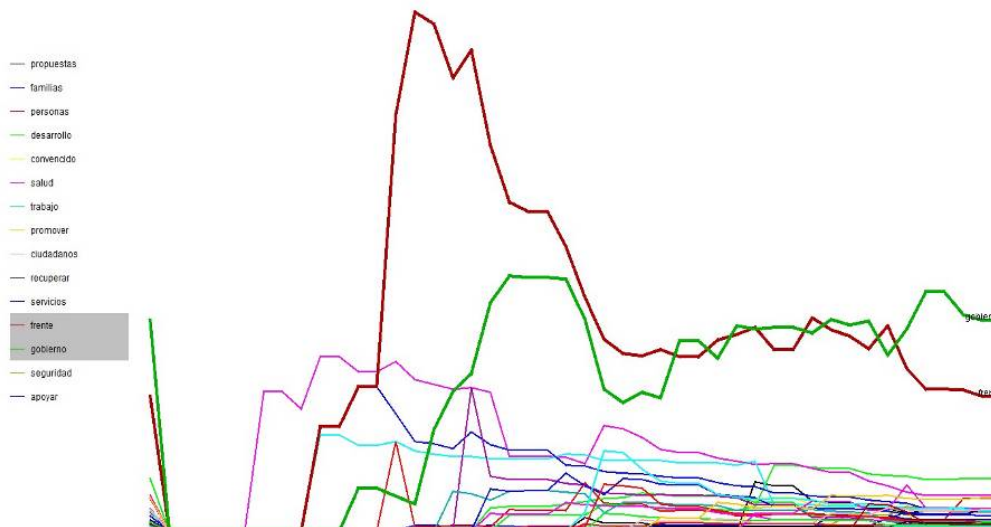


Figura 10 Análisis de centralidad por intermediación grafo de palabras @RicardoAnayaC.

Finalmente, las palabras que cuentan con una mayor centralidad de intermediación para el candidato @JoseAMeadeK (figura 11) son: “@lopezobrador”, “delincuentes”, “familia”, “oportunidad”, “historia”. Esto refleja que la mayor parte de sus discursos en Twitter el elemento central es “@lopezobrador\_” probablemente como estrategia de desacreditación del candidato oponente. Otra palabra central en su discurso es “familia”, la cual está muy ligada a la característica esencial de su campaña política.

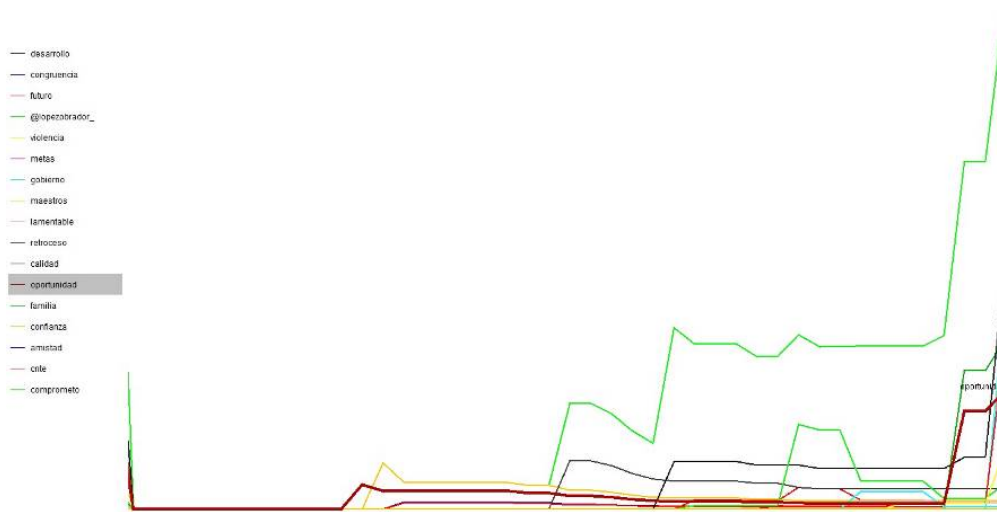


Figura 11 Análisis de centralidad por intermediación grafo de palabras @JoseAMeadeK.

## 4. Discusión

El número de mensajes publicados por los candidatos son importantes para el liderazgo que puedan mostrar. En este caso los tres candidatos analizados muestran una publicación constante en Twitter y cada uno con tendencias diversas y exponiendo diferentes estrategias. Este liderazgo en Twitter no genera necesariamente una tendencia al triunfo, sin embargo, con el avance de las redes sociales y su fácil acceso puede ser un factor importante para posicionar ciertas opiniones por parte de los candidatos.

La capacidad de predicción en Twitter puede ser un espacio de interés para el estudio de la comunicación política y análisis de discurso, la medición de las estrategias electorales, en sus efectos y niveles de influencia, y para la calidad de la democracia. El seguimiento y la proyección de las tendencias generadas por las redes sociales seguirán mejorando, por lo que pueden ser oportunidades para restablecer vínculos con la ciudadanía digital.

## 5. Conclusiones

El propósito de este estudio fue examinar si el Análisis de las Redes Sociales respaldado por una aplicación para el análisis del discurso, podría proporcionar un nuevo enfoque para identificar nuevos elementos que nos ayuden a entender las

publicaciones vertidas a partir de Twitter. A pesar de que el corpus utilizado en este estudio es pequeño, fue posible analizar el potencial de este enfoque propuesto mediante el análisis de conjuntos de datos.

El tipo de análisis realizado se basa mucho en la interpretación que pudiera darse de la información y de la situación en la que estén ocurriendo las publicaciones de Twitter.

El análisis de frecuencia de palabras, aunque es un elemento importante, no toma en cuenta el contexto real de la publicación del tuit, por lo tanto, probablemente la frecuencia no sea lo más importante sino la importancia del término utilizado. En este caso la interpretación cambiaría drásticamente.

En segundo lugar, los grafos generados automáticamente son interpretados de manera visual y de cierta manera discrecional por parte de los autores de este trabajo por lo que resultaría importante poder generar una tipología de grafos propia de las campañas políticas para brindar mayor exactitud en el análisis.

Finalmente, no hemos discutido suficientemente las medidas alternativas basadas en el análisis de la centralidad en las redes sociales que pueden utilizarse para examinar diversas ponderaciones en la centralidad de las palabras. En este estudio, usamos solo la medida de centralidad por intermediación para detectar algunos patrones e identificación de palabras claves en las unidades de discurso. Ciertamente, hay muchas otras medidas que se pueden utilizar para identificar patrones que apoyan y exhiban información importante para el análisis. Se necesita un análisis sistemático con conjuntos de datos más grandes para establecer pautas y / o teorías que ayuden a determinar y seleccionar medidas apropiadas. Con todas estas limitantes, ha resultado interesante examinar este inicio de campañas de los tres principales candidatos a la presidencia de México. Es importante mencionar que el contexto del proceso electoral es cambiante y cuenta con variables diferentes en distintos momentos (debates presidenciales, inclusión de candidaturas independientes, etc.), por lo que las tendencias y el análisis discursivo de los candidatos actuales tendrá que cambiar.

Es importante, desde este punto de vista, tener un seguimiento importante de las diferentes etapas de la campaña electoral, todo para examinar la evolución del

contenido de los discursos políticos en las redes sociales. Será importante de igual manera ampliar el análisis a otras plataformas sociales como los son Facebook, Instagram y YouTube, dado que los candidatos también hacen proselitismo a partir de estos otros medios digitales.

Finalmente sería importante realizar una comparación de los medios sociales digitales con los medios tradicionales (tv y prensa) para poder identificar tendencias, patrones y diferencias entre ambos medios de interacción.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Brown, E. D. Will twitter make you a better investor? a look at sentiment, user reputation and their effect on the stock market. In Conference proceedings for the southern association for information systems SAIS conference (pp. 36-42), 2012.
- [2] Castells, M. El poder de las redes y las redes del poder. El entorno tecnológico de la comunicación. Madrid, Alianza, 2009.
- [3] Chamlerwat, W., Bhattarakosol, P., & Rungkasiri, T. Discovering consumer insight from twitter via sentiment analysis. Journal of Universal Computer Science, 18(8), 2012.
- [4] Criado, J. Ignacio; Villodre, Julián. Public employees in social media communities: Exploring factors for internal collaboration using social network analysis. First Monday, v. 23, n. 4. 2018.
- [5] Delany, C. Online politics, the tools and tactics of Online Politic Advocacy: [www.epolitics.com](http://www.epolitics.com), 2008
- [6] Graham, T. et al. Between broadcasting political messages and interacting with voters en Information, communication and society. Londres, Routledge, 2013.
- [7] Kumar, R., Novak, J., Tomkins, A. Structure and evolution of on-line social networks, In: Proceedings of the 12th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining 2006.
- [8] Reinhard Diestel. Graph Theory (5th ed.). Springer Publishing Company, Incorporated, 2017.



- [9] Mills, A., Chen, R., Lee, J., & Raghav Rao, H. Web 2.0 emergency applications: How useful can Twitter be for emergency response? *Journal of Information Privacy and Security*, 5(3), 2009.
- [10] Sarlo, B. *La audacia y el cálculo. Kirchner 2003-2010*. BBAA, Sudamericana, 2011.
- [11] Stewart, Leo Graiden, Ahmer Arif and Kate Starbird. *Examining Trolls and Polarization with a Retweet Network*. (2018).
- [12] Wan-Shiou Yang; Jia-Ben Dia; Hung-Chi Cheng; Hsing-Tzu Lin, *Mining Social Networks for Targeted Advertising*. *System Sciences*, 2006. HICSS '06. *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on*, vol.6, no.pp. 137a- 137a, 04-07 Jan. 2006.
- [13] Zafarani R, Abbasi MA, Liu H. *Social Media Mining an Introduction*. Cambridge University; 2014.
- [14] Zwaenepoel, W. *Really Big Data: Analytics on Graphs with Trillions of Edges*. In *LIPICs-Leibniz International Proceedings in Informatics Vol. 70* 2017.

# **PROTOTIPO FUNCIONAL PARA CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES CON SALIDA DE AUDIO EN UN SISTEMA EMBEBIDO CON RED NEURONAL CONVOLUCIONAL**

## *FUNCTIONAL PROTOTYPE FOR CLASSIFICATION OF IMAGES WITH AUDIO OUTPUT IN AN EMBEDDED SYSTEM USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK*

**Fidel López Saca**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*fidelosmcc@gmail.com*

**Andrés Ferreyra Ramírez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*fra@correo.azc.uam.mx*

**Carlos Avilés Cruz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*caviles@correo.azc.uam.mx*

### **Resumen**

En los últimos años, las redes neuronales convolucionales, han tenido una gran popularidad en aplicaciones de clasificación de imágenes, principalmente porque superan en rendimiento a los algoritmos tradicionales. Sin embargo, su alto costo computacional complica su implementación en sistemas embebidos con pocos recursos como las Raspberry Pi 3. Para superar este problema, se puede hacer uso del “Neural Compute Stick”, un dispositivo desarrollado recientemente, que integra una GPU en la que se puede cargar una red neuronal convolucional pre-entrenada. En este artículo se presenta un prototipo basado en la Raspberry Pi 3, que realiza clasificación de imágenes con reproducción de audio. La clasificación se realiza con la red GoogleNet, la cual es entrenada fuera de línea, implementada en un NCS e integrada a la tarjeta Raspberry Pi 3. En el sistema propuesto, la imagen que ingresa a través de una cámara web, es clasificada y etiquetada con la red convolucional y finalmente la etiqueta es traducida en audio por el sistema embebido para describir el objeto encontrado en la imagen.

**Palabras Claves:** Movidius stick, Raspberry, red neuronal convolucional, TensorFlow, visión por computador.

## **Abstract**

*In recent years, convolutional neural networks (CNN) have become very popular in image classification applications, mainly because they outperform traditional algorithms in performance. However, its high computational cost complicates its implementation in embedded systems with few resources such as Raspberry Pi 3. To overcome this problem, a "Neural Compute Stick" (NCS) can be used, which integrates a GPU. In the NCS can be loaded a pre-trained convolutional neural network. This article presents a prototype based on a Raspberry Pi 3, which performs image classification with audio reproduction. The classification is done through a GoogleNet net, which is trained offline, implemented in the NCS and integrated with the Raspberry Pi 3 card. In the proposed system, the image that enters through a webcam is classified and tagged with the CNN. Finally, the tag is translated into an audio file to be heard.*

**Keywords:** Computer vision, movidius stick, Raspberry, convolutional neural network, TensorFlow.

## **1. Introducción**

El aprendizaje profundo es un subcampo específico del aprendizaje automático, un enfoque que utiliza arquitecturas compuestas de múltiples capas de transformaciones no lineales, para aprender representaciones a partir de datos y que pone énfasis en el aprendizaje de capas sucesivas de representaciones cada vez más significativas. Una de las arquitecturas más populares utilizadas hoy en día son las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés), ya que cada una de sus capas, modela un campo receptivo de la corteza visual primaria del cerebro biológico; lo que las hace muy efectivas en tareas de visión artificial. Dado que las CNN emulan la visión humana, tienen una alta precisión para tareas de reconocimiento de imágenes y han demostrado un rendimiento casi humano en muchas tareas de visión artificial del mundo real, incluyendo la clasificación de

imágenes [Ciresan, 2011] [Krizhevsky, 2012], el reconocimiento [Zhang, 2015] [Mollahosseini, 2016] y la detección de objetos [Sermanet, 2014] [Girshick, 2014], el diagnóstico por imágenes médicas [Prasoon, 2013], la segmentación de escenas y el etiquetado [Karpathy, 2015], etc.

El entrenamiento de una CNN compleja representa un alto costo computacional, por lo que, la mayoría de modelos están entrenados e implementados con plataformas de software, utilizando potentes unidades de procesamiento gráfico (GPU, por sus siglas en inglés) [Vasilache, 2014] [Strigl, 2010] como motores de cálculo, que tienen numerosas unidades de ejecución y gran ancho de banda de memoria para obtener un alto rendimiento computacional.

En aplicaciones de reconocimiento en tiempo real, las redes pequeñas (con pocas capas) han sido implementadas en dispositivos móviles con pocos recursos de memoria y procesamiento, por ejemplo: MobileNet [Howard, 2017] entrenada con ImageNet [Stanford, 2017] para la clasificación de 1000 objetos diferentes, se ha implementado en celulares con sistema operativo Android para detectar la retinopatía diabética, entrenada y probada con más de 16,000 imágenes preprocesadas para la detección de este problema [Suriyal, 2018]. Sin embargo, redes muy grandes (con muchas capas) no pueden ser implementadas en dispositivos móviles, ni en sistemas embebidos de bajo costo tales como: Arduino, Beagle y Raspberry, ya que sus procesadores de propósito general no han sido optimizados para la implementación de estas redes.

Las CNN han sido implementadas en sistemas de visión embebidos para aplicaciones tales como: reconocimiento de escritura a mano [LeCun, 1998], detección de rostros [Sankaradas, 2009], reconocimiento de objetos [Farabet, 2010], y determinación de escenas [Peemen, 2013]. En estos sistemas de visión embebidos, el entrenamiento de la CNN se realizó fuera de línea, y el modelo pre-entrenado se ejecutó en tiempo real. Utilizaron procesadores demasiado lentos lo que demandaba la aceleración de la CNN para la ejecución en tiempo real, la cual solo se podía lograr con la integración de GPU en los sistemas embebidos; sin embargo, la solución no era muy adecuada ya que las GPU consumían muy alta potencia.

A principios del 2014, empezaron a surgir supercomputadoras móviles para el desarrollo de sistemas embebidos las cuales aprovechan los recursos de cómputo de procesadores de primera generación (con diferentes arquitecturas y GPU) que posibilitan el desarrollo de una nueva generación de aplicaciones que emplean la visualización por computadora, el procesamiento de imágenes y el procesamiento de datos en tiempo real, para los sectores de robótica, medicina, aeroespacial y fabricación de automóviles. Estas plataformas año con año duplican su rendimiento y reducen el consumo de potencia, lo que las hace muy atractivas para entrenar e implementar CNN embebidas; sin embargo, tienen un problema, son relativamente costosas y de difícil acceso.

Los problemas de implementación de CNN en sistemas embebidos de bajo costo como la Raspberry Pi 3, pueden ser resueltos con el uso de un Neural Compute Stick (NCS) [Xu, 2017], un dispositivo con conexión USB de bajo consumo de potencia y costo, que integra una GPU que soporta la carga de redes diseñadas y entrenadas en plataformas de aprendizaje profundo como Caffe [Caffe, 2018] y TensorFlow [TensorFlow, 2018]; éste dispositivo soporta redes tales como: AlexNet [Krizhevsky, 2012], GoogleNet [Szegedy, 2015] y ResNet [He, 2016].

La implementación de CNN en sistemas embebidos de bajo costo, puede acelerar el camino de la computación embebida hacia el futuro, permitiendo el desarrollo de aplicaciones en donde las máquinas interactúen y se adapten a sus entornos en tiempo real. En este artículo se presenta un prototipo basado en la Raspberry Pi 3, que realiza clasificación de imágenes con reproducción de audio. La clasificación es realizada por la CNN GoogleNet, la cual es entrenada fuera de línea, implementada en un NCS e integrada a la tarjeta Raspberry Pi 3.

## **2. Métodos**

El prototipo está dividido en dos etapas: la etapa de entrenamiento y evaluación de la CNN y la etapa de implementación de la red en el sistema embebido Raspberry Pi 3, figura 1. En esta sección se describe: cada uno de los dispositivos principales del prototipo, el entrenamiento y la evaluación de la CNN, la implementación de la CNN en el NCS, y el conjunto de datos utilizado.

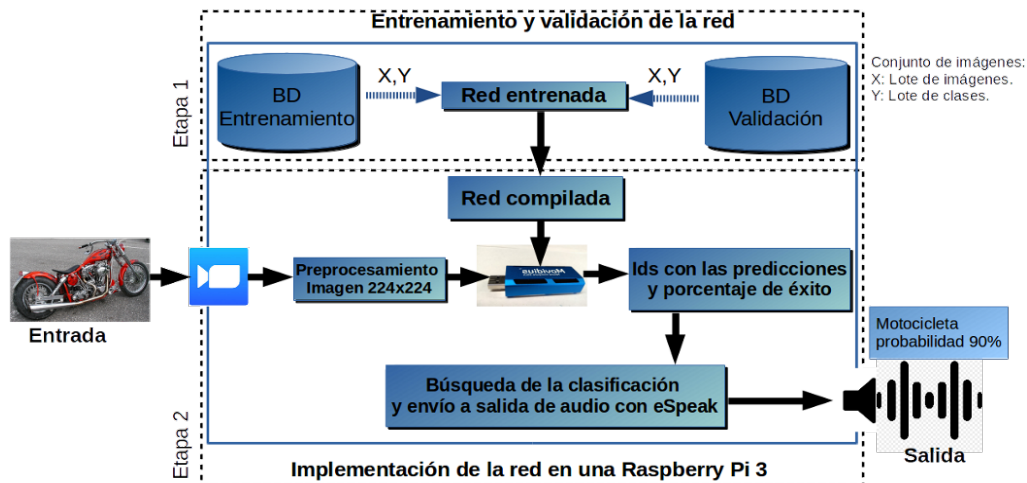


Figura 1 Metodología general.

### Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi 3 [Raspberry Pi, 2018], es una poderosa mini computadora basada en un procesador ARMv8 Cortex A53, un procesador de cuatro núcleos a 1.2 GHz de 64 bits. Está equipada con: 1 GB de memoria RAM, 802.11n Wireless LAN (10/100Mbps de velocidad), Bluetooth 4.1 de baja energía (BLE), 4 puertos USB, 40 pines GPIO (General Purpose Input Output), puerto HDMI completo, Interfaz de cámara (CSI), Interfaz de pantalla (DSI), ranura para tarjeta Micro SD, salida estéreo y un procesador gráfico VideoCore IV 3D, ver figura 2. Su precio asequible, compatibilidad con otros dispositivos, alta flexibilidad, rendimiento adecuado, recursos disponibles y una amplia comunidad de usuarios; hacen de esta plataforma, la elección ideal para desarrollar aplicaciones embebidas basadas en aprendizaje automático.

### Neural Compute Stick (NCS)

El Intel® Movidius™ Neural Compute Stick, es un pequeño dispositivo USB 3.0 de bajo costo diseñado para implementar redes de aprendizaje profundo, en especial CNN, en aplicaciones de baja potencia que requieren inferencia en tiempo real. Internamente contiene un procesador Movidius™ Myriad™ 2, una unidad de procesamiento de visión (VPU, por sus siglas en inglés) que ofrece un alto rendimiento en entornos con energía limitada y su arquitectura no depende de una

conexión a Internet. Está diseñado para trabajar en un rango de temperatura de 0 a 40 °C y sus dimensiones son de 72.5mm x 14mm, figura 2. En [Xu, 2017] se muestran comparaciones de su capacidad de procesamiento.

El NCS tiene un toolkit “Intel® Movidius™ NCS Quick Start” [NCS Quick Star, 2018], y ejemplos “Neural Compute Application Zoo (NC App Zoo)” [Neural, 2018] con Caffe [Caffe, 2018] y TensorFlow [TensorFlow, 2018].



Figura 2 Dispositivos principales del prototipo.

### **Red neuronal convolucional: entrenamiento y prueba**

La CNN adoptada para el sistema propuesto es GoogleNet [Szegedy, 2015], un modelo de 144 capas que se puede dividir en diferentes secciones básicas: el tallo (stem), los módulos de inicio (inception modules), clasificadores auxiliares, y el clasificador de salida. El tallo está formado por una secuencia de operaciones de convolución, agrupación (pooling) y operaciones de normalización de respuesta local. Cada uno de los nueve módulos de inicio, está formado por un conjunto de convoluciones y agrupaciones a diferentes escalas, cada una hecha en paralelo y posteriormente concatenadas. Los clasificadores auxiliares se ramifican desde la red principal, y tienen como objetivo amplificar la señal de gradiente a través de la red, intentando mejorar las representaciones anteriores de los datos. Finalmente, el clasificador de salida, realiza una operación de agrupación promedio (average pooling) seguida de una activación “softmax” en una capa totalmente conectada.

La CNN fue entrenada utilizando descenso de gradiente estocástico con un tamaño de lote de 32, momento de 0.9 y una disminución de pesos (factor de regularización) de 0.00004. Los pesos iniciales en cada una de las capas de convolución y completamente conectas, fueron inicializados utilizando el algoritmo de inicialización Xavier; en el cual, los pesos son aleatoriamente inicializados con una

media cero y una varianza que depende de la cantidad de conexiones entrantes y salientes de la capa. Los umbrales de activación en cada una de las capas fueron inicializados a cero. El número de épocas de entrenamiento se fijó a 650. Se inició con una tasa de aprendizaje de 0.001 la cual se disminuyó en un factor de 0.98 después de cada 2 épocas.

Para evaluar el rendimiento de la CNN, la red se entrenó desde cero, y la base de datos utilizada fue dividida en conjunto de entrenamiento y prueba. El conjunto de entrenamiento fue formado con el 70% de las imágenes de la base de datos y el 30% restante se utilizó para formar el conjunto de prueba; estos conjuntos fueron guardados en archivos tfrecord [TensorFlow, 2018]. La CNN fue entrenada y validada en una Workstation con 16 GB de memoria RAM, utilizando una GPU NVIDIA GeForce GTX TITAN X con 3072 núcleos y 12 GB de memoria, utilizando el marco de aprendizaje profundo TensorFlow [TensorFlow, 2018].

### **Implementación de la red en la Raspberry Pi 3**

La Raspberry Pi 3 a través de una cámara web, captura la imagen a analizar en formato RGB, la imagen es redimensionada a un tamaño de 224x224x3 ajustándola al tamaño requerido por la capa de entrada de la CNN. La imagen redimensionada es enviada al NCS para determinar la categoría de los objetos que contiene. Finalmente, la Raspberry Pi 3, genera y reproduce una salida de audio que describe la clase a la que pertenece la imagen visualizada. El software eSpeak [eSpeak, 2018], fue instalado en el sistema operativo y utilizado para convertir el texto que describe la clase en audio, el cual es reproducido por la bocina. El software incluye diferentes voces y permite alterar sus características.

El NCS es el dispositivo en donde se carga la CNN preentrenada para la aplicación. El NCS recibe la imagen de la Raspberry Pi 3 y realiza la clasificación del objeto preponderante que contiene la imagen. La predicción es regresada a la Raspberry Pi 3 para que ésta genere y reproduzca la salida de audio que describe la clase del objeto visualizado.

En la figura 3, se muestra la integración de los elementos principales del prototipo propuesto, la Raspberry Pi 3 y el “Neural Compute Stick”. La programación de la



Raspberry Pi 3 se hizo en Python 2.7, usando la librería OpenCV 3.4. La Raspberry captura 18 fotogramas cada 3 segundos, tiempo en el cual, el NCS realiza 18 clasificaciones de las imágenes instantáneas. Si durante los 3 segundos, la salida del NCS es la misma clase, la Raspberry traduce en audio la etiqueta de la clase para describir el objeto encontrado en la imagen y guarda en disco una copia de la imagen junto con su etiqueta.



Figura 3 Prototipo funcional para clasificación de objetos en imágenes con salida de audio en un sistema embebido con red neuronal convolucional.

Procedimiento simple, basado en TensorFlow, para cargar la CNN preentrenada en el NCS; cabe aclarar que la CNN es diseñada y preentrenada en un servidor utilizando herramientas apropiadas para ese fin:

- En primer lugar, se entrena la CNN diseñada utilizando una base de datos para la aplicación deseada. El entrenamiento se realiza bajo el ambiente de trabajo, TensorFlow y Python. Al final del entrenamiento, TensorFlow genera y guarda tres archivos: `.index`, `.meta` y `.data`, los cuales contienen toda la información del entrenamiento.
- En segundo lugar, se realiza una transferencia de aprendizaje de la CNN entrenada, en donde se remueve de la red: el algoritmo de aprendizaje y las últimas dos capas “Dropout” y “Classification”. Con esto, la capa Softmax es declarada como la capa de salida de la red, generando como variable de salida `varOutput = softmax()` la cual dará las predicciones de las distintas

clases. Al final de este paso, se generan y guardan nuevamente los tres archivos con las extensiones mencionadas en el punto anterior.

- Los tres archivos de inferencia generados en el punto 2, son utilizados para generar un archivo con extensión *\*.graph* a través del compilador del SDK (kit de desarrollo de software) del NCS. Esta tarea es realizada con el comando siguiente: *mvNCCompile MiRed\_inference.meta -s 12 -in variable\_entrada -on variable\_salida -o MiRed\_inference.graph*. Para más detalles sobre la compilación consultar [NC SDK, 2018].
- Una vez generado el archivo *\*graph* que contiene la CNN entrenada, se codifica para que sea cargado en el NCS; la Raspberry Pi 3 recibe las clasificaciones generadas por el NCS para cada imagen de consulta.

Los primeros tres puntos del procedimiento anterior se realizan en el servidor, el punto cuatro se implementa en la Raspberry Pi 3.

### **Base de datos**

En este trabajo, se utilizó el conjunto de datos “Visual Object Classes Challenge 2012 (VOC2012)” [Everingham, 2018], la cual consta de 11,540 imágenes a color de alta resolución pertenecientes a 20 clases.

Cada clase contiene de 303 a 4,087 imágenes y la mayoría de las categorías tienen alrededor de 550 imágenes.

Se seleccionaron cinco clases (“carro”, “gato”, “perro”, “motocicleta” y “persona”), para formar un subconjunto con 8,140 imágenes; donde la clase con el menor número de imágenes es “motocicleta” con 526, y la clase con el mayor número de imágenes es “persona” con 4,087.

Para no lidiar con el desbalance de las clases del subconjunto de imágenes, se estandarizó el número de imágenes por clase, a la clase con el menor número de imágenes, para formar un conjunto de 2,630 imágenes; este es el conjunto base para el entrenamiento y prueba de la CNN. La estandarización se realizó de manera aleatoria.

## Requisitos del prototipo

En la tabla 1 se resumen las características del Hardware y el Software utilizado para el desarrollo del prototipo propuesto.

Tabla 1 Características de Hardware y Software.

<b>Hardware</b>	Entrenamiento: <ul style="list-style-type: none"><li>• GPU NVIDIA GeForce GTX TITAN X, con 12 GB de memoria RAM y 3076 núcleos.</li><li>• Workstation Dell T7600, Procesador Intel(R) Xeon(R), 16 Gb de Memoria RAM, 1 disco duro de 500 GB.</li></ul>
	Implementación: <ul style="list-style-type: none"><li>• Neural Compute Stick: USB 3, 4 GB LPDDR3, Precisión FP16.</li><li>• Raspberry Pi 3 Model B: CPU Quad Core 1.2 GHz, Broadcom, BCM2837 de 64bits, 1 GB de RAM, Chip BCM43438 wireless LAN y Bluetooth, GPIO de 40 pines, 32 GB de memoria Micro SD.</li><li>• Cámara Web.</li><li>• Bocina con entrada plug 3.5 mm.</li></ul>
<b>Software</b>	Entrenamiento: <ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema operativo Linux Ubuntu 16.04, kernel 4.12.</li><li>• Python 2.7.</li><li>• TensorFlow v1.4.</li><li>• NVIDIA CUDA® 8.0.</li><li>• NVIDIA cuDNN v5.1.</li></ul>
	Implementación: <ul style="list-style-type: none"><li>• Sistema operativo Raspbian Stretch.</li><li>• Neural Compute SDK.</li><li>• OpenCV 3.4.</li><li>• eSpeak text to speech v18.</li></ul>

## 3. Resultados

### Entrenamiento y prueba de la CNN

En la figura 4 se muestran las gráficas de exactitud de entrenamiento y prueba obtenidas para la red GoogleNet después de 650 épocas de entrenamiento. En entrenamiento, la CNN llega a una exactitud del 98.75% en las 650 épocas, mientras que en la fase de prueba la red logra un rendimiento máximo de 60.13%. Obsérvese que después de la época 450, la exactitud de entrenamiento se incrementa mientras que la exactitud de prueba permanece constante, lo que indica, que la red quedó

ajustada a características muy específicas de los datos de entrenamiento; es decir, la red sufre de sobreajuste.

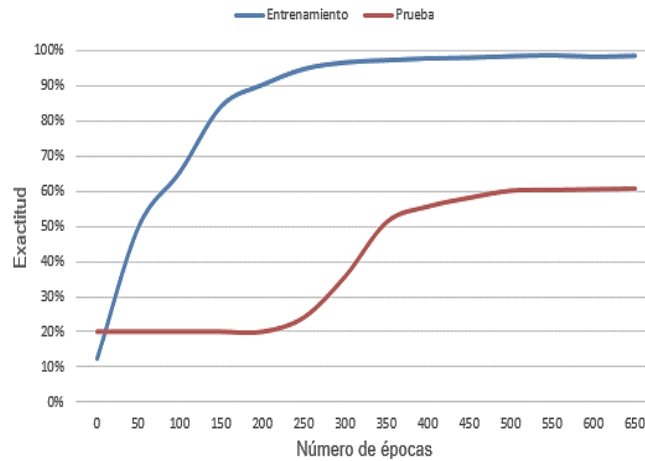


Figura 4 Gráficas de exactitud de la CNN entrenada en 650 épocas.

Para visualizar mejor el rendimiento de la CNN en la fase de prueba, en la figura 5, se muestra una matriz de confusión, en la cual cada fila representa el número de predicciones de cada clase, mientras que cada columna representa los ejemplos de una clase real.

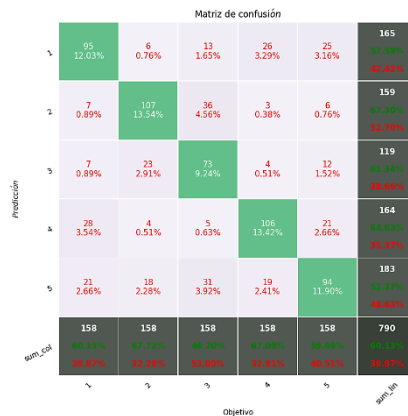


Figura 5 Matriz de confusión para la fase de prueba de la CNN.

Las celdas diagonales corresponden a los ejemplos que están clasificados correctamente. Las celdas fuera de la diagonal corresponden a ejemplos incorrectamente clasificados. En cada celda se muestran tanto el número de

ejemplos como el porcentaje del número total de ejemplos. La columna en el extremo derecho de la gráfica muestra los porcentajes de todos los ejemplos que se predice que pertenecen a cada clase que están clasificados correcta e incorrectamente. La fila en la parte inferior de la gráfica muestra los porcentajes de todos los ejemplos que pertenecen a cada clase que están clasificados correcta e incorrectamente. Finalmente, la celda en la parte inferior derecha de la gráfica muestra la precisión general. Las clases con el mejor rendimiento fueron “gato” (2) y “motocicleta” (4) con el 67.72% y 67.09% respectivamente; mientras que la clase con el peor rendimiento fue “perro” con el 46.20%. La red tiene problemas para distinguir entre “carro” y “motocicleta”, y entre “gato” y “perro”. La red también confunde “persona” con “carro” o “motocicleta”, esto debido a que una gran cantidad de imágenes de la clase “persona” contienen carros o motocicletas.

### Implementación de la red en la Raspberry Pi 3

Las pruebas se llevaron a cabo en el estacionamiento de la universidad para detectar autos, personas y motocicletas; para detectar perros y gatos las pruebas se realizaron en diferentes hogares. Se experimentó con 10 pruebas por clase a una distancia de entre un metro y tres metros para clasificar a las personas. Para los carros y las motocicletas, la distancia fue de tres a cinco metros como máximo. En la figura 6 se muestran los resultados de las predicciones de las 5 clases, con imágenes reales, utilizando el prototipo.

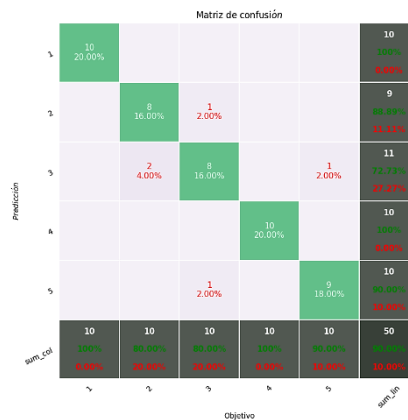


Figura 6 Matriz de confusión para la clasificación de imágenes utilizando el prototipo.

El prototipo logró predecir con una exactitud del 100% a las clases “carro” y “motocicleta”; mientras que para las clases “persona”, “gato” y “perro”, el éxito fue menor. La precisión de predicción total de la red en las pruebas realizadas fue del 90%; sin embargo, la red tiene problemas en la predicción de las clases “gato” y “perro” principalmente. La red tiene buen éxito de predicción cuando la imagen que capta la cámara contiene sólo una de las cinco clases, como se puede apreciar en las figuras 7 y 8, donde el prototipo la clasifica los objetos con una exactitud del 100%. Sin embargo, la red puede tener problemas de predicción con imágenes que contienen más de una de las cinco clases.

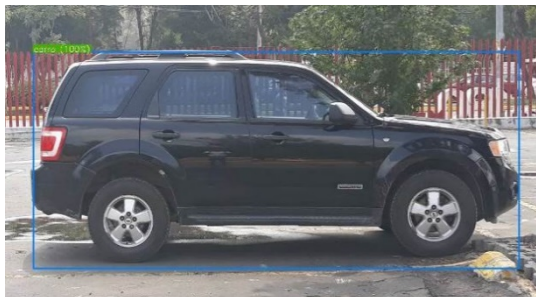


Figura 7 Imagen de Camioneta dentro del estacionamiento de la UAM-Azcapotzalco.



Figura 8 Imagen de un alumno dentro de un laboratorio de la UAM-Azcapotzalco.

#### **4. Discusión**

La implementación de redes neuronales convolucionales en sistemas embebidos de bajo costo, para aplicaciones de visión artificial, es relativamente fácil con el uso del NCS. La instalación del software para ambos dispositivos es relativamente sencilla, sin embargo, el entrenamiento y compilación (archivo \*.graph) de la red son un poco complicados.

La cantidad insuficiente de imágenes utilizadas para el entrenamiento de una red tan profunda como GoogleNet, produce un rendimiento pobre en la fase de prueba. Entrenar la red con un número grande de épocas, no implica obtener un mejor rendimiento en prueba, pero sí puede provocar que la red se adapte cada vez más a los ejemplos de entrenamiento causando el sobreajuste de la red. La CNN alcanza su máximo rendimiento en prueba en aproximadamente en 450 épocas y permanece constante hasta el final de entrenamiento, señal del sobreajuste que está presentando. Para garantizar un entrenamiento eficiente y un aumento considerable en el rendimiento en la fase de prueba, es necesario utilizar un conjunto de entrenamiento lo suficientemente grande; que se podría obtener aplicando la técnica de aumento de datos, la cual puede aumentar el tamaño del conjunto de entrenamiento 10 veces o más, haciendo a la red más robusta para evitar el sobreajuste.

En los conjuntos de entrenamiento y prueba existen imágenes que pertenecen a una clase, pero incluyen elementos de otras clases, por ejemplo, en la figura 9 se muestra una imagen que pertenece a la clase “carro” que también incluye a las clases “persona”, “motocicleta” y “perro”. Imágenes como estas confunden mucho al clasificador y producen un rendimiento de prueba bajo.



Figura 9 Imagen que contiene cuatro de las cinco clases utilizadas.

Eliminar este tipo de imágenes del conjunto de datos, podría mejorar el rendimiento de la red; sin embargo, esto no sería una buena idea ya que este tipo de imágenes son muy comunes en calles y avenidas hoy en día. El clasificador desarrollado en

el prototipo, solo considera la clasificación de una clase a la vez, no una combinación de ellas. La reproducción en audio de la etiqueta del objeto clasificado, se realiza correctamente; sin embargo, se podría mejorar seleccionando diferentes tipos de voz y variando los parámetros de frecuencia y duración.

## **5. Conclusiones**

Los resultados obtenidos en este trabajo, indican que tanto la profundidad de la CNN como el tamaño del conjunto de entrenamiento, son cruciales para que la red alcance un rendimiento alto en la fase de prueba; en otras palabras, para que la red tenga una buena capacidad de generalización.

El Neural Compute Stick, es un dispositivo muy confiable para la implementación de redes neuronales convolucionales profundas y su integración con sistemas embebidos de bajo costo, como la Raspberry Pi 3, es muy simple; sin embargo, hay que tener cuidado con la compilación y la descarga de la red.

El prototipo portátil desarrollado, tiene la capacidad de clasificar 5 clases de objetos diferentes y de reproducir una salida de audio describiendo la clase a la que pertenece el objeto. Sistemas con estas características, pueden ser de gran uso para desarrollar una gran cantidad de aplicaciones, por ejemplo, para ayudar a personas invidentes a encontrar objetos o para ayudar a niños de pre-escolar a aprender los nombres de los objetos, por citar algunos.

Como trabajo futuro se planea, evaluar el rendimiento del NCS con redes más profundas, por ejemplo: ResNet 152. Redes entrenadas con conjuntos de datos que contienen miles o millones de imágenes a color de alta resolución, desarrolladas para la detección de objetos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Caffe: <http://caffe.berkeleyvision.org/>, Agosto 2018.
- [2] Ciresan, D, C., Meier, U., Masci, J., Gambardella, L., Schmidhuber, J., Flexible high performance convolutional neural networks for image classification. In Proceeding of the Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence, Vol. 2, 1237-1242, 2011.



- [3] eSpeak: <http://espeak.sourceforge.net/commands.html>, Abril 2018.
- [4] Everingham, M. and Van-Gool, L. and Williams, C. K. I. and Winn, J. and Zisserman. The PASCAL Visual Object Classes Challenge 2012 (VOC2012) Results:<http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2012/workshop/index.html>.
- [5] Farabet, C., Martini, B., Akselrod, P., Talay, S., LeCun, Y., Culurciello E., Hardware accelerated convolutional neural networks for synthetic vision systems. In Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 257-260, 2010.
- [6] Girshick, R., Donahue, J., Darrell, T., Malik, J., Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 580-587, 2014.
- [7] He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 770-778, 2016.
- [8] Howard, A., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., Andreetto, M., Adam, H., MobileNet: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. CoRR, vol. abs/1704.04861, 2017.
- [9] Karpathy, A., Fei-Fei, L., Deep visual-semantic alignments for generating image descriptions. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 3128-3137, 2015.
- [10] Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hilton, G., ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In Advances in Neural Information Processing Systems 25, 1097-1105, 2012.
- [11] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P., Gradient-based learning applied to document recognition. In Proceedings of the IEEE, Vol. 86, Issue 11, 2278-2324, 1998.
- [12] Mollahosseini, A., Chan, D., Mahoor, M, H., Going deeper in facial expression recognition using deep neural networks. In Proceeding IEEE Conference on Applications of Computer Vision (WACV), 1-10, 2016.

- [13] Neural Compute Application Zoo (NC App Zoo): <https://github.com/movidius/ncappzoo/>.
- [14] NC SDK, Intel® Movidius™: [https://movidius.github.io/ncsdk/tf\\_compile\\_guidance.html](https://movidius.github.io/ncsdk/tf_compile_guidance.html).
- [15] NCS Quick Star, Intel® Movidius™: <https://developer.movidius.com/start>.
- [16] Peemen, M., Setio, A., Mesman, B., Corporaal, H., Memory-centric accelerator design for convolutional neural networks. 31<sup>st</sup> International Conference on Computer Design, 13-19, 2013.
- [17] Prason, A., Petersen, K., Igel, C., Lauze, F., Dam, E., Nielsen, M., Deep feature learning for knee cartilage segmentation using a triplanar convolutional neural network. In International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 246-253, 2013.
- [18] Raspberry Pi: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b/>.
- [19] Sankaradas, M., Jakkula, V., Cadambi, S., Chakradhar, S., Durdanovic, I., Cosatto, E., Graf, H., A massively parallel coprocessor for convolutional neural networks. 20<sup>th</sup> IEEE International Conference on Application-specific Systems, Architectures and Processors, 53-60, 2009.
- [20] Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R., LeCun, Y., OverFeat: Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks. Journal: arXiv preprint arXiv: 1312.6229, 2014: <https://arxiv.org/pdf/1312.6229.pdf>.
- [21] Stanford Vision Lab, Stanford University, Imagenet. <http://imagenet.org>, Octubre 2017.
- [22] Strigl, D., Kofler, K., Podlipnig, S., Performance and scalability of gpu-based convolutional neural networks. In Proceeding 18<sup>th</sup> Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing (PDP), 317-324, 2010.
- [23] Suriyal S., Druzgalski C., Gautam K. Mobile assisted diabetic retinopathy detection using deep neural network. 2018 Global Medical Engineering Physics Exchanges/Pan American Health Care Exchanges (GMEPE/PAHCE), marzo 2018.

- [24] Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., Rabinovich, A. Going Deeper with Convolutions. In Proceedings of The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June, 2015.
- [25] Tafjira, N, B., Shun-Feng, S., Towards self-driving car using convolutional neural network and road lane detector. 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro--Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT), 65-69, 2017.
- [26] TensorFlow: <https://www.tensorflow.org/>.
- [27] Vasilache, N., Johnson, J., Mathieu, M., Chintala, S., Piantino, S., LeCun, Y., Fast convolutional net with fbfft: A gpu performance evaluation. arXiv preprint arXiv:1412.7580, 2014: <https://arxiv.org/pdf/1412.7580.pdf>.
- [28] Xu, X., Amaro, J., Caulfield, S., Forembski, A., Falcao, G., and Maloney, D. Convolutional Neural Network on Neural Compute Stick for Voxelized Point-clouds Classification. 10<sup>th</sup> International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI), 2017.

# **AUTOMATIZACIÓN DE LA ETAPA DE CORTE DE UNA EXTRUSORA DE PLÁSTICO TERMOFIJO**

## *AUTOMATION OF THE CUTTING STAGE OF A TERMOFIJO PLASTIC EXTRUDER*

***Miguel Magos Rivera***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*mrm@azc.uam.mx*

***Jose Antonio Lara Chavez***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*jalch@azc.uam.mx*

***Juan F. Cuevas Olivares***

Universidad Autónoma Metropolitana

### **Resumen**

En este artículo se presenta el diseño y la implementación de la automatización del sistema de corte para una extrusora de una empresa fabricante de plástico termofijo. El material producido por esta máquina es una pasta la cual es moldeada para que tome la forma de un cilindro continuo. Por requerimientos de los clientes, el material tiene que ser cortado en porciones de longitud determinada, antes de ser empacado. A su vez, dependiendo del tipo de material producido es necesario emplear diferentes mecanismos de corte. El sistema de control de corte diseñado está basado en un Controlador Lógico Programable y cuenta con tres modos distintos de operación. La configuración del sistema la realiza el operador mediante una interfaz diseñada para este fin. Por medio de una serie de menús que se despliegan en una pantalla LCD y con ayuda de un teclado, es posible elegir el método de corte a utilizar. Las etapas de diseño y construcción son presentadas, así como el resultado obtenido. El sistema tiene 24 meses operando adecuadamente necesitando únicamente el mantenimiento normal asociado a equipos industriales. El beneficio para la empresa se reflejó en una menor cantidad de piezas fuera de especificación, así como en la reducción del tiempo de paro relacionado con el cambio de tipo de corte.

**Palabras clave:** Automatización industrial, controladores lógicos programables, extrusora, interfaz de usuario, plástico termofijo.

## **Abstrac**

*This paper, presents the design and implementation of the automation of the cutting system of an extruder of a plastic manufacturer. The material produced by this machine is a paste which is molded to take the form of a continuous cylinder. For customer requirements, the material has to be cut into portions of determined length, before being packed. In turn, depending on the type of material produced it is necessary to use different cutting mechanisms. The cutting control system designed is based on a Programmable Logic Controller and it has three operation modes. System configuration is performed through an interface designed for this purpose. The cutting method to be used is selected by means of a keyboard and a series of menus that are displayed on an LCD screen. The design and construction stages are presented, as well as the result obtained. The system has 24 months operating properly, needing only the normal maintenance associated with industrial equipment. The benefit for the company was reflected in a smaller number of parts out of specification, as well as in the reduction of the time of unemployment related to the change of type of cut.*

**Keywords:** Extruder, industrial automation, programmable logic controllers, thermofix plastic, user Interface.

## **1. Introducción**

### **Problemática**

Debido a su bajo costo y a sus propiedades mecánicas, los plásticos han remplazado a materiales tales como: la madera, acero, cerámica y cemento, sólo por mencionar algunos. Un ejemplo de lo anterior se encuentra en [Drobny,1988], donde se presentan diversas aplicaciones de los plásticos en industrias tan distintas como la automotriz y la médica.

La empresa para la cual se desarrolló el proyecto presentado se dedica a fabricar diversos compuestos moldeables, entre los cuales se encuentra un plástico

termofijo. Este material, una vez que ha sido moldeado, no puede cambiar de forma, a diferencia de los termoplásticos que mediante calor pueden fundirse y volver a utilizarse, [Stevens, 1998], [Groover, 2007]. El plástico termofijo es la base para la fabricación de diversos elementos empleados en la industria automotriz, eléctrica y de productos electrodomésticos, entre otras. Este termofijo es el resultado de la mezcla de diversos materiales de acuerdo a una formulación y proceso determinados, que establecen las cantidades de cada material, así como los tiempos de duración de cada una de las etapas del proceso. El producto obtenido es una pasta que se envía a los clientes bajo distintas presentaciones. En varias de las líneas de producción de la empresa, el material fabricado es introducido a una extrusora la cual produce un cilindro continuo de material, que es cortado en porciones de longitud determinada.

Antes de iniciar el proyecto de automatización que aquí se describe, el control de los dispositivos de corte del material se realizaba en forma manual. Este modo de funcionamiento implicaba demasiadas piezas fuera de especificación, lo cual provocaba desperdicio de material. A su vez, el cambio del tipo de mecanismo de corte, debido a especificaciones de los productos, requería varias horas de paro de las líneas de producción. Tomando en cuenta lo anterior, la empresa decidió llevar a cabo la automatización de la etapa de corte de sus extrusoras empleando como elemento central un Controlador Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés).

### **Estado del arte**

El Controlador Lógico Programable es la herramienta más empleada en aplicaciones de automatización industrial. Lo anterior se debe a la enorme versatilidad que este tipo de equipos tiene para emplearse en el control de procesos de prácticamente cualquier rama industrial, [Peixoto, 2014]. Estos equipos cuentan con módulos de entradas y salidas digitales, siendo posible agregar puertos para entradas y salidas analógicas. De manera similar, pueden ser complementados con módulos de comunicación, lo cual amplía sus opciones de conectividad con otros equipos, [Kiran, 2013]. Existen múltiples trabajos en los cuales se reporta la aplicación de PLCs; en [Bittrick, 2007], se presenta un análisis del impacto que los

sistemas de automatización han tenido en la industria cervecera. Se destaca al PLC como un elemento que simplificó el control de los diversos procesos que intervienen en la fabricación de esta bebida. Por su parte, en [Magos, 2010] se presenta una aplicación de tipo industrial en la cual se emplea un PLC de la marca Siemens para el control de la secuencia de operación de una mezcladora para la fabricación de plástico. El empleo de estos dispositivos en industria automotriz también ha sido reportado; por ejemplo, en [Hamilton, 2018] se presenta la automatización de una línea de extrusión en una planta armadora de Mitsubishi en Brasil empleando PLCs de Allen Bradley. Aquí se destaca la reducción de tiempo que se tiene en la etapa de diseño al utilizar este tipo de equipos. La aplicación de este tipo de controladores en equipos CNC también ha sido estudiada. En [Gill, 2018] se plantea cual será el rol del PLC en los procesos de manufactura mecánica bajo el concepto de Industria 4.0. La implementación de algoritmos modernos de control en Controladores Lógicos Programables ha sido también reportada. En [Priyanka, 2018] se presenta el uso de un algoritmo de control PID basado en lógica difusa empleado para el monitoreo y control de flujo en oleoductos. A nivel laboratorio también existen aplicaciones que han sido reportadas. En [Bayindir, 2011] los autores presentan el empleo de un PLC para el bombeo de agua. En este trabajo se destaca la capacidad de comunicación del equipo, lo que facilita su conexión en lugares donde el cableado es difícil de implementar. Bajo esta misma línea de aplicaciones de laboratorio, podemos mencionar el trabajo presentado en [Aquino, 2015].

En este artículo los autores exponen la forma en que se empleó un Controlador Lógico Programable en el control del módulo de calentamiento de una máquina para ensayos de torsión en caliente. Los anteriores son solo algunos ejemplos de aplicación de este tipo de controladores, en [Alphonsus, 2016] los autores presentan una revisión bibliográfica más amplia de proyectos industriales en los cuales el PLC es el dispositivo central.

## **2. Método**

El equipo automatizado realiza el corte de material plástico extruido mediante dos mecanismos. El primero se basa en una cuchilla montada en un pistón neumático,

mientras que el segundo emplea una cuchilla giratoria. A su vez el sistema neumático cuenta con dos opciones: cuchilla tipo placa y cuchilla de doble filo.

El elemento central del sistema de control del corte es un Controlador Lógico Programable, para esta aplicación se seleccionó un modelo que cuenta con un teclado y una pantalla alfanumérica. Estos elementos del controlador se emplearon para la elaboración de una interfaz que, mediante un menú de opciones, permite al usuario seleccionar el tipo de corte a utilizar.

Antes de detallar los elementos que componen a los mecanismos de corte, se presenta una breve descripción de la línea de producción. Esta sección del artículo concluye con la exposición de la automatización realizada.

### **Descripción de la línea de producción**

La extrusora cuyo sistema de corte fue automatizado, se muestra en la figura 1. El equipo basa su operación en la rotación de un tornillo sinfín cuyo giro es producido por un motor eléctrico trifásico de 10 hp. Este elemento se encuentra acoplado al eje del tornillo mediante un sistema de cadenas de transmisión. La alimentación manual del producto se realiza en la parte superior del equipo y cuenta con boquillas intercambiables.

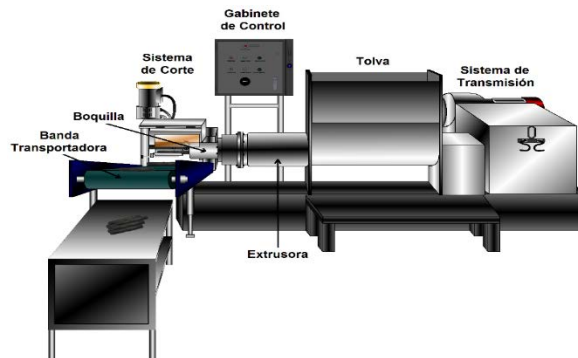


Figura 1 Línea de producción.

El material sale de la extrusora en forma continua, por lo que a la salida de la boquilla se cuenta con un sistema de corte que proporciona porciones de determinada longitud. Una banda transportadora recibe el cilindro de material cortado y lo traslada a la zona de empaque. El último elemento que conforma la línea de



producción, es un gabinete de control en el cual se ubica el controlador y algunos de los elementos eléctricos empleados en la automatización.

## **Sistema de corte neumático**

### **Cuchilla tipo placa**

En esta opción se utiliza como elemento de corte una placa metálica con filo en uno de sus lados, la cual se encuentra fija en el extremo de un cilindro neumático. Al detectarse que se tiene una porción de material de la longitud especificada, el sistema de control debe realizar las acciones necesarias para que se efectúe un ciclo bajar/subir del pistón, lo que provocará el corte de la pieza. La figura 2, muestra el mecanismo empleado.

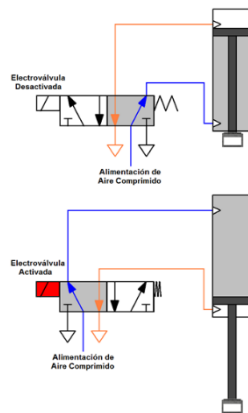


Figura 2 Sistema de corte neumático tipo placa.

### **Cuchilla de doble filo**

Esta opción es similar a la anterior, también se realiza mediante el desplazamiento del elemento de corte por medio de un pistón neumático. La diferencia radica en que ahora la cuchilla es una lámina con doble filo colocada en un arco metálico fijo al extremo del cilindro neumático. Al momento que se detecta una porción de material de la longitud especificada, el control hace descender el pistón efectuando el corte. El pistón mantiene esa posición hasta que se detecta un nuevo cilindro de material, en ese momento se hace subir la cuchilla. Para este tipo de cuchilla una operación de corte se realiza con el ascenso o descenso del pistón neumático. La figura 3 muestra vista de la cuchilla empleada en esta opción de corte.



Figura 3 Cuchilla de doble filo.

### Sistema de corte con cuchilla giratoria

Esta opción de corte está conformada por dos cuchillas con correderas metálicas montadas a 180° sobre un vástago como se muestra en la figura 4.

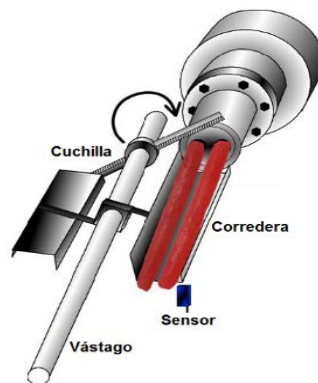


Figura 4 Sistema de corte con cuchillas giratorias.

El eje con las navajas se encuentra conectado a un motor eléctrico vía un embrague electromecánico. Este elemento cuenta con tres balatas, la primera al estar unida al eje del motor proporciona el movimiento giratorio, la segunda se encuentra sujeta a la carcasa del embrague y sirve como freno. Ubicada entre las dos primeras, la tercera balata puede desplazarse longitudinalmente para estar en contacto con la que gira o bien con la que sirve de freno. La posición de esta última balata es determinada por el estado de un electroimán incluido en el embrague, y es en ella que se encuentra instalado el vástago con las cuchillas.

En estado estable la balata con las cuchillas está en contacto con la que hace la función de freno. Al momento que se detecta una porción de material de la longitud especificada, el control activa el electroimán del embrague poniéndola esta vez en contacto con la balata del motor. La acción anterior dura el tiempo suficiente para

que el vástago gire 180° regresando el embrague a su posición de frenado. La secuencia de estos pasos permite realizar una operación de corte. La figura 5 muestra una vista del mecanismo descrito.

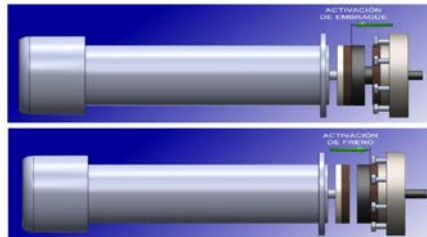


Figura 5 Funcionamiento del embrague del sistema de corte con cuchillas giratorias.

### **Sistema de control de corte**

El objetivo de esta etapa del sistema es accionar, en el momento correcto, el elemento que realiza el corte de las porciones extruidas. En el caso del corte mediante pistón neumático, el elemento a controlar es la electroválvula que permite el paso de aire comprimido. Cuando el corte se realiza con las cuchillas giratorias el elemento a controlar es el embrague electromecánico, específicamente, el electroimán del mismo. En ambos casos, el instante correcto para efectuar una operación de corte es determinado por sensores de proximidad. Estos señalan al controlador que una porción de material con la longitud establecida ha sido extruida y debe ser seccionada. El mecanismo de corte con cuchillas giratorias cuenta con un sensor adicional que indica cuando el vástago ha girado 180°. Esta información permite al controlador generar las señales necesarias para colocar al embrague en su posición de frenado, una vez que el corte se ha realizado. La secuencia de control de corte es manejada mediante un Controlador Lógico Programable (PLC). El modelo seleccionado para este proyecto cuenta con una pantalla de cristal líquido, así como un conjunto de ocho teclas. Estos elementos conforman la interfaz de usuario que permite señalarle al controlador que tipo de corte se va a utilizar. Se elaboraron dos subrutinas de control una para cada tipo de corte. Con base en la información recibida desde la interfaz de usuario, el programa principal decide que subrutina se ejecutará. La figura 6 muestra un diagrama de bloques con las secciones que conforman el sistema de control de la etapa de corte de la extrusora.

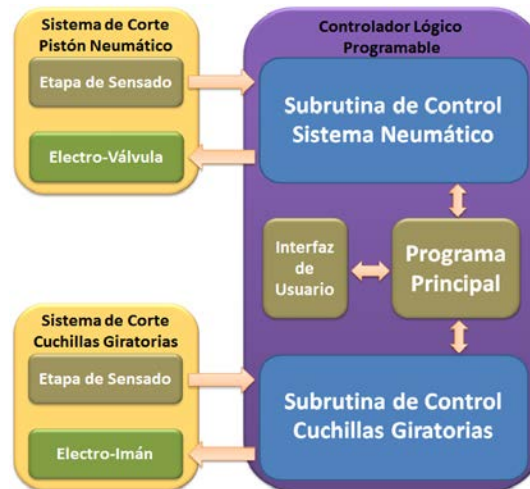


Figura 6 Diagrama de bloques del sistema de control de corte.

### Sistema de corte neumático

**Etapa de sensado.** En este modo de operación se utiliza un sensor de presencia el cual se encuentra instalado frente a la boquilla del extrusor. Este elemento se ubica a una distancia igual a la longitud que se desea tenga el cilindro extruido. De esta forma, la detección del inicio del segmento de material señala que se tiene una porción del tamaño necesario. Se seleccionó para esta aplicación el modelo E3S-CL1 de la marca Omron, se trata de un sensor de tipo fotoeléctrico difuso con un alcance máximo de 20 cm. El rango de alimentación de voltaje es de 10 a 30 VDC, con salida de 24 VDC. Su encapsulado es de tipo rectangular con cable integrado [Omron, 2018]. Con el fin de acoplar la señal de salida del sensor (24 VDC) con la requerida en la entrada del PLC (120 VAC), se agregó un relevador electromecánico.

**Electroválvula.** Este dispositivo permite el paso de aire comprimido al cilindro neumático de doble efecto en cuyo extremo se encuentra montada la cuchilla. Se trata de una electroválvula 5/2 activada por una bobina de 120 VAC con retorno por resorte. Las condiciones de activación de la bobina de la electroválvula se encuentran establecidas en el programa del PLC. La configuración del equipo electromecánico es el mismo para los dos tipos de opciones de corte mediante pistón neumático, lo que cambia es la secuencia del controlador.

## Sistema de corte con cuchillas giratorias

**Etapa de sensado.** En este sistema de corte están involucrados dos sensores: el que detecta el inicio de una porción de material y el que señala el giro de 180° del vástago con las cuchillas de corte. Para el primero de los dispositivos se eligió el mismo sensor que se empleó en el mecanismo neumático: el modelo E3S-CL1 de la marca Omron. En este caso también se utiliza un relevador para acoplar el nivel de voltaje de la salida del sensor con el de la entrada del controlador.

Para la detección del giro del vástago con las cuchillas, se seleccionó un sensor de fin de carrera con accionamiento lateral de la serie BAF1 de Honeywell. El dispositivo cuenta con un interruptor de 1 polo 2 tiros con capacidad de 15 A [Honeywell, 2015]. En este caso no se requiere de acoplamiento de señales ya que el sensor puede manejar los niveles de voltaje requeridos por el controlador.

Como ya se mencionó, este sistema realiza un corte haciendo girar 180° el vástago con las cuchillas. La señal de activación del embrague para iniciar el movimiento giratorio es proporcionada por el sensor fotoeléctrico, mientras que la señal para desactivar el embrague la entrega el sensor de giro. Para activar el movimiento únicamente 180°, el vástago cuenta con dos protuberancias las cuales accionan al sensor de límite. La figura 7 muestra el funcionamiento de esta sección de la etapa de sensado del sistema de corte con cuchillas giratorias.



Figura 7 Sensor de giro y protuberancias en el vástago con cuchillas.

**Embrague electromecánico.** Como ya se mencionó, el motor del sistema de corte opera en forma continua, por lo que se incluyó un sistema de embrague-freno de tipo electromecánico. Se empleó un modelo de la familia PMB del fabricante Thomson Industries, se trata de un conjunto que permite tanto transmitir el giro de

un motor a una carga, como frenarla. Su funcionamiento es por fricción entre discos que se acoplan mediante un electroimán. El voltaje de activación de este dispositivo es de 90 VDC. La generación de movimiento para este sistema de corte se realiza por medio de un motor trifásico 240 VAC y un variador de velocidad. El encendido del sistema de transmisión se realiza manualmente en el gabinete de control, mientras que la activación del embrague se realiza mediante una de las salidas del PLC. Se emplea un relevador electromecánico para acoplar el voltaje de salida del controlador (120 VAC) con el del embrague (90 VDC).

### **Controlador lógico programable**

El sistema de control de corte está basado en un Controlador Lógico Programable, este dispositivo determina, con base en un programa almacenado en su memoria y la configuración que se proporciona vía la interfaz de usuario, cuál de los dos sistemas de corte se empleará: Neumático o Cuchillas Giratorias. Asimismo, es el encargado de activar el dispositivo asociado a la función de corte: electroválvula para el caso del sistema neumático o embrague para el sistema de cuchillas giratorias.

El controlador seleccionado para esta aplicación fue el modelo ZEN10C3AR-AV2 de la marca Omron. Se trata de un controlador de baja capacidad (96 líneas de programa), pero que cubre las necesidades del proyecto, además de abrir la posibilidad de modificaciones o ampliaciones futuras. Las características básicas de este controlador son: Alimentación de 120 VAC, con 6 entradas digitales a 120 VAC y 4 salidas a relevador. Cuenta con una pantalla alfanumérica con 4 líneas de 12 caracteres cada una. Así mismo, tiene 8 teclas que permiten el envío de comandos al programa de control [Omron, 2008].

Los elementos que fueron conectados a las entradas del PLC son dos: el sensor fotoeléctrico que detecta el inicio de una porción de material y el sensor de límite que detecta el giro del motor del sistema de corte por cuchillas giratorias.

En cuanto a las salidas también se tienen conectados dos elementos: la electroválvula del pistón para el sistema de corte neumático y el electroimán del embrague electromagnético para el sistema de corte con cuchillas.

**Interfaz de usuario.** Como ya se mencionó, el PLC cuenta con una pequeña pantalla LCD y 8 teclas las cuales fueron configuradas en esta aplicación para que el operador especifique el tipo de sistema de corte que se utilizará. Son 10 mensajes en los que se despliegan menús que guían al usuario en la configuración del sistema de control. Con ayuda de las teclas que el controlador tiene en su cara frontal, se seleccionan los parámetros necesarios para indicar la opción de corte que se desea emplear.

**Programa del PLC.** Al encenderse el sistema, se ejecuta el programa principal desarrollado para el Controlador Lógico Programable en diagrama de escalera. Este se encarga de desplegar los mensajes del menú de configuración, así como determinar, a partir de la información proporcionada por el usuario, el tipo de corte a efectuar. Enseguida se ejecuta una de tres subrutinas: Corte neumático con cuchilla tipo placa, Corte neumático con cuchilla de doble filo o Corte con cuchillas giratorias. La lectura de las señales de los sensores, así como el accionamiento del actuador correspondiente al modo seleccionado, la efectúa el PLC dentro de la subrutina asociada. En la figura 8 se muestra el diagrama de flujo del programa implementado en el PLC.

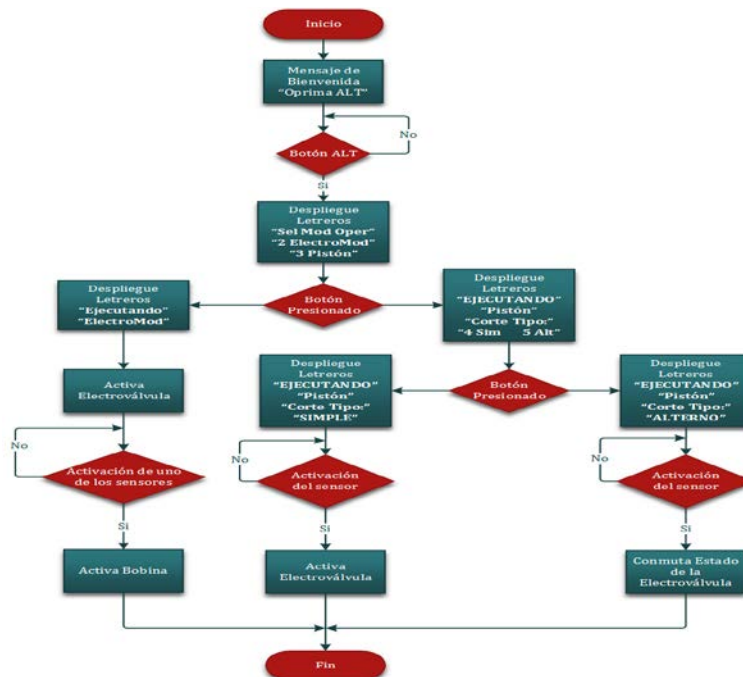


Figura 8 Diagrama de flujo del programa del PLC.

### 3. Resultados

A continuación, se presenta el desglose de los resultados obtenidos los cuales engloban la interface desarrollada, así como el equipo físico construido.

#### Interfaz de usuario

Como ya se mencionó, son 10 las pantallas que conforman la interfaz de usuario que permite la configuración del tipo de corte que se desea utilizar. En la figura 9 se muestran dos de las pantallas del sistema. La primera despliega el mensaje de bienvenida que aparece al encender el equipo, mientras que la segunda pantalla contiene el menú de selección del tipo de corte. En la figura 10 se muestran las pantallas que corresponden a la selección del tipo de corte neumático (pistón) con cuchilla tipo placa (simple). El resto de las pantallas son similares a las que se muestran a manera de ejemplo.

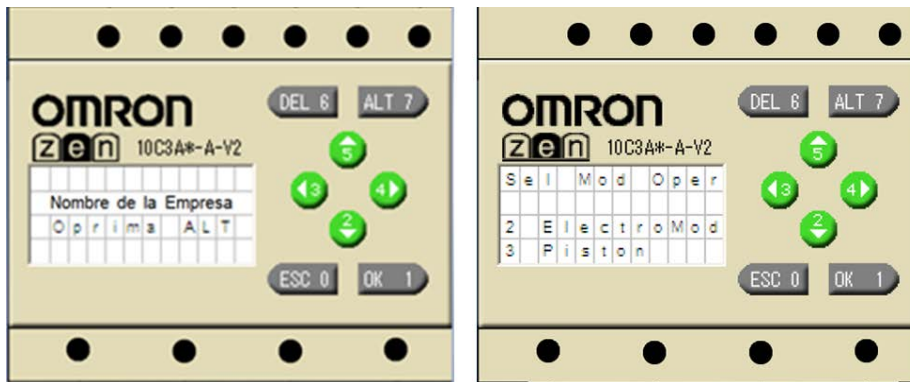


Figura 9 Mensaje de bienvenida y selección del tipo de corte.

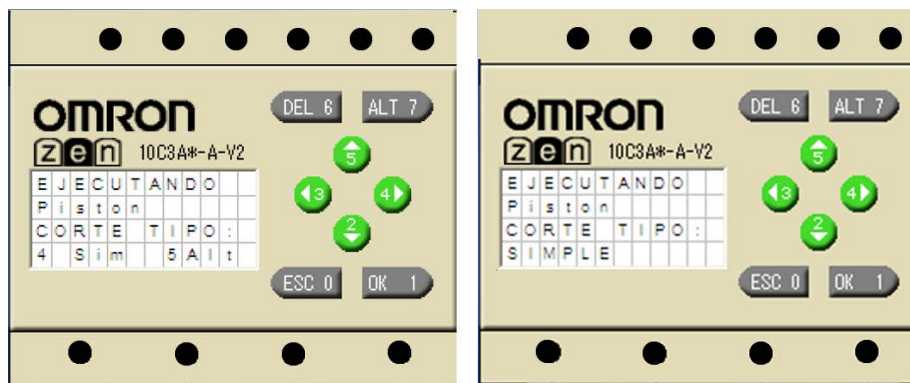


Figura 10 Selección del modo de operación.



## **Gabinete de control**

El Controlador Lógico Programable se instaló al interior de un gabinete metálico de 550 mm de ancho, 510 mm de largo y 200 mm de profundidad, de la marca Square-D. Dentro de este tablero se encuentran los contactores y variadores de velocidad de los tres motores eléctricos involucrados en la línea de producción. También aquí se ubicaron los relevadores de acoplamiento descritos, así como la fuente de voltaje que alimenta de corriente continua a los elementos del sistema de control de corte. La mayoría de los dispositivos se montaron sobre segmentos de riel normalizado DIN, los cuales a su vez se fijaron a la platina metálica del gabinete. Las conexiones entre los componentes se realizaron empleando clemas y cables con etiquetas numéricas, lo anterior con el fin de facilitar futuras modificaciones, así como el mantenimiento del equipo. Los cables de conexiones se encuentran contenidos en diversos tramos de canaleta plástica de 1 pulgada. En la puerta del gabinete se instaló el interruptor de Encendido/Apagado del equipo, así como los botones de arranque y paro de los motores con sus indicadores correspondientes. Las figuras 11 y 12, muestran imágenes del gabinete de control construido.

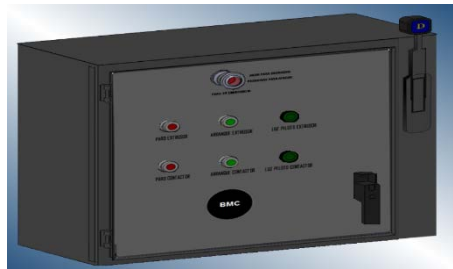


Figura 11 Vista exterior del tablero de control del sistema de corte.

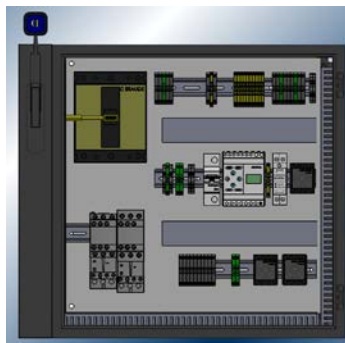


Figura 12 Vista interior del tablero de control del sistema de corte.

## **4. Discusión**

No obstante que el controlador seleccionado para la aplicación tiene un número reducido de entradas y salidas, resultó suficiente para cumplir con los requisitos establecidos por el personal de la empresa. Más aun, quedaron disponibles puertos de conexión para posibles ampliaciones del sistema. Un comentario similar puede hacerse con respecto a la interfaz de usuario. El hecho de contar con un número reducido de líneas y caracteres para desplegar mensajes no representa un problema mayor. Como puede observarse en las pantallas que se incluyeron a manera de ejemplo en la sección anterior del artículo, se emplearon abreviaturas para la mayoría de las palabras. Lo anterior pudiese representar una fuente de error al configurar el sistema, pero debe tomarse en cuenta que el cambio de tipo de corte lo realiza un supervisor y esto no ocurre todos los días. La opción con cuchilla de doble filo permitió disminuir la cantidad de aire comprimido, así como el desgaste de los elementos neumáticos involucrados. Lo anterior comparando con el sistema de corte neumático mediante cuchilla tipo placa.

El empleo del embrague electromecánico en el corte con cuchillas giratorias está relacionado con el consumo de energía eléctrica del motor que proporciona el giro al vástago. Aunque el tiempo para extruir un segmento de material con las dimensiones correctas es variable, éste es de 5 segundos aproximadamente, lo anterior implicaría encender momentáneamente el motor cada vez que se cumple este período. Es conocido que en el arranque de un motor eléctrico se consume un pico de energía que es varias veces superior a la utilizada en el estado estable. Por lo anterior, el mantener encendido permanentemente el motor en lugar de activarlo cada 5 segundos, implica un menor consumo de energía, amortizando de esta forma la inversión realizada en el embrague.

## **5. Conclusiones**

Tomando en cuenta los requisitos propuestos por la empresa al momento de plantear el proyecto, se considera que los objetivos fueron alcanzados en forma adecuada. Cabe mencionar que, dados los beneficios observados en los primeros meses de utilización del sistema, la empresa decidió replicar la automatización en

dos líneas de producción similares. Los equipos tienen cerca de 24 meses operando correctamente. Los paros por mantenimiento se han reducido considerablemente, así como el tiempo para cambiar el tipo de corte. Adicionalmente, el desperdicio de material que existía antes de realizar el proyecto descrito disminuyó considerablemente.

Como puede observarse, los beneficios para la empresa son importantes, pero también se debe considerar que la colaboración Empresa-Universidad para la realización de este tipo de proyectos implica que los profesores y alumnos participantes pueden estar en contacto con sistemas reales de producción. Lo anterior deja abierta la posibilidad a los profesores de transmitir conocimientos y experiencias a los estudiantes en el salón de clases. Por su parte, los alumnos involucrados en este tipo de trabajos obtienen experiencia profesional que en diversas instituciones de educación superior es difícil de tener.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alphonsus, E.R. and Abdullah, M.O. (2016). A review on the applications of Programmable Logic Controllers (PLCs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1185-1205.
- [2] Aquino, G. Magos, M. Mancilla, J.E. (2015). Control del módulo de calentamiento e instrumentación de una máquina para ensayos de torsión en caliente. *Pistas Educativas*, vol. 112, pp. 144-163.
- [3] Bayindir, R. and Cetinceviz, Y. (2011). A water pumping control system with a programmable logic controller (PLC) and industrial wireless modules for industrial plants-An experimental setup. *ISA Transactions*, vol. 50, issue 2, pp. 321-328.
- [4] Bittrick, P. (2007). Towards the lights-out brewery. A brewer's view of automation. *The brewer & distiller international*, vol. 3, issue. 4, pp. 1-5.
- [5] Drobny, J. (1988). Applications of thermoplastic elastomers. *Handbook of Thermoplastic Elastomers 2nd Edition*, Van Nostrand Reinhold, U.K..
- [6] Gill, S. (2018). Role of CNCs and PLCs in the factory of the future. *Control Engineering*, vol. 65, issue 1, pp. 27-28.

- [7] Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas, Ed. Mc Graw Hill Interamericana, España.
- [8] Hamilton, J. (2018). The benefits of a modular control system design approach. *Control Engineering*, vol. 65, issue 1, pp. 18-20.
- [9] Honeywell International. (2015). Micro switch BAF/DTF Series. Honeywell International, USA.
- [10] Kiran, A.R. Sundeep, B.V. Vardhan, C.S. and Mathews, N. (2013). The principle of programmable logic controller and its role in automation. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, issue 3, pp. 500-502.
- [11] Magos, M. Flores, O. Soldevilla, F. and Ángeles, L. (2010). Automatización de una mezcladora para la fabricación de plástico termofijo. *Proceedings XIV Congreso Latinoamericano de Control Automático*, pp. 301-308, Santiago de Chile.
- [12] Omron Corporation. (2008). ZEN Programmable relay. Operation manual, Omron Corporation, Japan 2008.
- [13] Omron Corporation. (2018). Distance settable photoelectric sensor with metal case, E3S-CL, Omron, Corporation, <http://www.ia.omron.com/products/family/415/>.
- [14] Priyanka, E.B. Maheswari, C. and Thangavel, S. (2018). Online monitoring and control of flow rate in oil pipelines transportation system by using PLC based Fuzzy-PID Controller. *Flow Measurement and Instrumentation*, in press.
- [15] Peixoto, J. Souza, J. Reis, B. and Pereira, C. (2014). MAS and PLC a comparasion on applications of manufacturing systems. *IFAC Proceedings*, vol. 47, issue 3, pp 2600-2604.
- [16] Stevens, M. (1998). *Polymer chemistry: An introduction*, Ed. Oxford University Press, Oxford, USA.

# **ANÁLISIS DE COBERTURA Y CAPACIDAD DE USUARIOS EN RED CELULAR GSM PARA SITUACIONES DE EMERGENCIA**

*ANALYSIS OF COVERAGE AND CAPACITY OF USERS IN GSM  
CELLULAR NETWORK FOR EMERGENCY SITUATIONS*

***Dulce Mayra Janet Martínez García***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*dulce.mjmartinez@outlook.com*

***Hugo Andrés Pérez Guerrero***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*hugoperez.nickell@gmail.com*

***Marco Aurelio Cárdenas Juárez***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*marco.cardenas@uaslp.mx*

***Ulises Pineda Rico***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*u.pinedarico@gmail.com*

***Enrique Stevens Navarro***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*estevens@galia.fc.uaslp.mx*

***Jorge Simón Rodríguez***

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología  
*jsimonro@conacyt.mx*

## **Resumen**

Las redes de comunicación celular son afectadas por los desastres naturales o provocados por el hombre, haciendo que sus servicios no estén disponibles parcial o totalmente. Aunque los desastres naturales son inevitables, sus efectos adversos en las redes de comunicación se pueden prevenir o minimizar. Es por eso que la resiliencia de los cuerpos de rescate es de gran importancia. En este trabajo, se presenta el análisis de cobertura y capacidad para una red de telefonía celular GSM de fácil implementación para ser utilizada tanto por los cuerpos de rescate y protección civil como por las víctimas de un siniestro. Los resultados cuantifican la

cobertura considerando el exponente de pérdida de trayectoria que se obtiene de mediciones en un ambiente real similar a un desastre y el número de usuarios que se pueden atender con el servicio básico de la red bajo estudio.

**Palabras Claves:** Celular, comunicación, emergencias, inalámbrica, resiliencia.

## **Abstract**

*Cellular communication networks are affected by natural or man-made disasters, making their services partially or totally unavailable. Although natural disasters are unavoidable, their adverse effects on communication networks can be prevented or minimized. That is why the resilience of the rescue bodies is of great importance. In this paper, we present the coverage and capacity analysis for a GSM mobile telephone network that can be easily used by both the rescue and civil protection entities and the victims of an accident. The results quantify the coverage considering the path loss exponent, which is obtained from measurements taken in an environment similar to that of a natural disaster, and the number of users that can be served with the basic service of the network under study.*

**Keywords:** Cellular, communication, emergencias, resilience, wireless.

## **1. Introducción**

Las redes de telefonía celular pueden resultar dañadas en eventos como terremotos, inundaciones, incendios, erupciones de volcán, entre otros. En el periodo posterior a estos, las redes celulares son necesarias para los cuerpos de protección civil y las víctimas en las tareas de rescate para minimizar la pérdida de vidas humanas. Las brigadas de emergencia deben actuar de manera rápida y eficiente utilizando sus propios sistemas de telefonía celular para restablecer la comunicación o para ofrecer un medio de comunicación alternativo a las víctimas, en beneficio de las poblaciones [Mauthe, 2016].

Recientemente han ocurrido diversos desastres en el planeta. El año pasado tres huracanes de categoría cuatro o superior afectaron seriamente el continente americano; como el huracán Harvey que a finales de agosto de 2017 golpeó con gran intensidad a Estados Unidos, dejando con numerosos daños materiales a

Texas. Posteriormente a principios de septiembre, tres huracanes más se formaron en el océano Atlántico: Irma, Katia y José; poniendo en riesgo nuevamente a Estados Unidos, México y el Caribe. Finalmente, el huracán María que a mediados de septiembre del mismo año puso en estado crítico a Puerto Rico dejando cuantiosos daños tanto materiales como humanos. Es importante mencionar también dos acontecimientos que ocurrieron en nuestro país, los terremotos del 7 y 19 de septiembre del 2017, que no sólo afectaron la ciudad de México sino también a estados vecinos. El primero de 8.2 grados en escala de Richter, que es el mayor ocurrido en el país, pero no tan desastroso como el del 19 de septiembre de 7.1 grados Richter. Aunque no ha sido el más catastrófico, ocasionó un gran desastre en cuanto a las comunicaciones, ya que las redes de telefonía celular se saturaron por la inmensa cantidad de llamadas realizadas por los usuarios; así como la necesidad de tener conexión a Internet para que las víctimas que se encontraban bajo los escombros de edificios caídos o en lugares de difícil acceso pudieran avisar a los equipos de rescate su ubicación. Más recientemente, a principios de junio de 2018, el volcán de Fuego en Guatemala hizo erupción, dejando centenares de víctimas mortales y devastación. Por esto es importante contar con un sistema que ofrezca servicio de telefonía e Internet durante estos sucesos para salvaguardar la vida humana y brindar resiliencia en términos de comunicación para los equipos de rescate y la población en general [Namuduri, 2017] - [Ferrus, 2012].

En este trabajo se presenta la integración un sistema portátil de comunicación móvil GSM para situaciones de emergencia y se analiza su cobertura y capacidad. En primera instancia, se implementa una estación base celular GSM, y se realizan pruebas para verificar su funcionamiento. Luego, se analiza el sistema en términos de cobertura y capacidad [Frolik, 2007]. Para lo anterior, se calcula el exponente de pérdida de trayectoria en un entorno similar a un desastre natural.

## **2. Métodos**

La tecnología de Radio Definido por Software (SDR, por sus siglas en inglés) ha permitido avances significativos en el desarrollo de prototipos innovadores para comunicaciones inalámbricas en los últimos años. Como su nombre lo indica, un

SDR es un dispositivo de radiofrecuencia (RF) que implementa a través de software componentes como mezcladores, filtros, moduladores, demoduladores o detectores; los que típicamente se implementan en hardware en un sistema electrónico de RF convencional. Así, la característica principal de un SDR es la capacidad de reconfiguración de un transceptor (i.e. transmisor y receptor) de radio, que le permite adaptarse a diferentes interfaces de comunicación e incorporar nuevas aplicaciones y servicios conforme van emergiendo; así como de actualización de tecnología por medio de software.

La tecnología SDR ha establecido un nuevo paradigma en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de comunicación inalámbrica; haciendo posible la implementación de estaciones base de telefonía celular sin necesidad de utilizar los equipos de propósito específico tradicionales de los operadores de telecomunicaciones. Convenientemente, con la tecnología SDR los costos de implementación, puesta en marcha y de operación de estaciones base de telefonía celular se reducen significativamente. En situaciones de emergencia, las víctimas se quedan sin acceso a señales 2G o 3G son por lo general en lugares de difícil acceso. Por lo tanto, implementar en estos lugares la misma infraestructura que se encuentra en entornos urbanos no es factible económicamente, además de ser poco práctico, dado que el tiempo es una limitante. Esto nos motiva a buscar soluciones alternas estaciones base celulares en situaciones de emergencias. Por este motivo, la tecnología SDR es adecuada para solventar la necesidad de proveer servicio de telefonía celular a víctimas de desastres en ubicaciones de difícil acceso. [Pinar, 2011]. El SDR en conjunto con OpenBTS permite la implementación de una red de telefonía celular GSM de bajo costo, con las funciones básicas de voz y datos. Cabe mencionar que OpenBTS es un software de código abierto que crea una interfaz para los teléfonos móviles de conectarse a una red celular GSM, este software se instala en una PC que cuente con sistema operativo Linux, junto con GNU Radio Asterisk, que es un programa de software libre bajo licencia GPL, que proporciona la función de una central telefónica (PBX) [Iledema, 2015].

De este modo, es posible crear una red de telefonía celular GSM, que cuenta con una Central de Servicio en donde se ejecuta Asterisk, que hace la función de



conmutador, que es el que se encarga de conectar las llamadas, enviar y recibir mensajes de texto, así como la administración de los usuarios; y 2 estaciones base adicionales (o torres), en donde solamente se ejecuta OpenBTS. Las figuras 1 y 2 muestran el diagrama de bloques de la estación base celular GSM y su implementación, respectivamente. Los servicios que la red celular propuesta puede ofrecer son:

- a) Llamadas de voz y mensajes de texto entre teléfonos celulares que se encuentran en la red celular rural.
- b) Llamadas de voz desde teléfonos celulares en la red celular rural hacia teléfonos fijos y celulares de compañías comerciales en el exterior.
- c) Llamadas desde teléfonos fijos y celulares de compañías comerciales en el exterior hacia teléfonos dentro de la red celular rural.

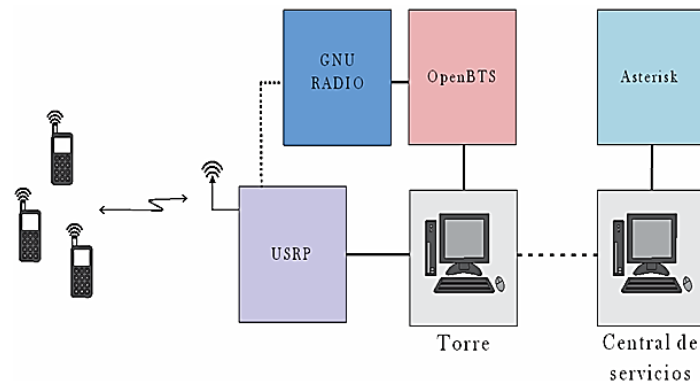


Figura 1 Diagrama de bloques de una estación base GSM basada en OpenBTS y SDR.



Figura 2 Implementación de la estación base GSM basada en OpenBTS y SDR.

## **Análisis de cobertura y cálculo de exponente de pérdida de trayectoria en escenarios de situaciones de emergencia**

En un escenario de emergencia provocada por desastres naturales o provocados por el hombre, pueden existir múltiples obstáculos que pueden interferir en la comunicación inalámbrica, por ejemplo, casas y edificios destruidos que pueden comportarse como dispersores naturales de las ondas electromagnéticas, creando ondas reflejadas. Es decir, la antena del móvil se encuentra rodeada de muchos obstáculos que ocasionan la atenuación de la señal durante la transmisión. A esta atenuación se le define como patrón de pérdida por propagación o pérdida de trayectoria (Path Loss - PL, por sus siglas en inglés). A continuación, se presenta un análisis numérico para el cálculo de pérdida de trayectoria y cobertura del prototipo propuesto conforme a [Lara, 1995], [Muñoz, 2002] y [Rappaport, 2001]. Adicionalmente, se toman mediciones de potencia en un escenario real para determinar experimentalmente el exponente de pérdida trayectoria de acuerdo con el método propuesto en [Frolik, 2007].

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la potencia de la señal entre el transmisor y el receptor cuando no hay ninguna obstrucción en línea de visibilidad directa entre ellos; mientras que en un modelo a gran escala predice cuanta potencia decae en función de la distancia de separación entre Transmisor y Receptor. Para calcular la pérdida de trayectoria en un radioenlace en el espacio libre, primero se determina la potencia recibida por una antena receptora separada de una antena transmisora a una distancia  $d$ , esta potencia recibida está dada por la ecuación 1, conocida como ecuación de Friss en el espacio libre [Rappaport, 2001].

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t}{4 \pi d^2} A_e \quad (1)$$

Donde  $P_t$  es la potencia transmitida,  $G_t$  es la ganancia de la antena transmisora y  $A_e$  es la apertura efectiva de la antena. Tomando en cuenta que la ganancia de cualquier antena está relacionada con su apertura efectiva como se muestra en la ecuación 2, donde  $A_e$  está relacionada con las características físicas de la antena y  $\lambda^2$  es la longitud de onda en metros, relacionada con la frecuencia de la portadora.

$$G = \frac{4 \pi A_e}{\lambda^2} \quad (2)$$

Entonces, la pérdida de potencia recibida por la antena queda representada por la ecuación 3.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4 \pi)^2 d^2} \quad (3)$$

La pérdida de trayectoria representa la atenuación de la señal como una cantidad positiva en dB, y está definida por la diferencia entre la potencia efectiva transmitida y la potencia recibida, por lo tanto, el  $PL$  en el espacio libre se describe por la ecuación 4.

$$PL(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log_{10} \left( \frac{\lambda^2}{(4 \pi)^2 d^2} \right) \quad (4)$$

Sabemos que en una comunicación inalámbrica existen múltiples obstáculos que atenúan la señal de comunicación, en un canal de radio móvil se muestra que la intensidad de la señal recibida en cualquier punto decae como una ley de potencia de la distancia entre el Transmisor y el Receptor. Entonces, la potencia recibida promedio  $P_r$  a una distancia  $d$  de la antena transmisora es aproximada por la ecuación 5, y con base en el modelo de propagación que indica que la potencia promedio de la señal recibida disminuye logarítmicamente con la distancia, la pérdida de trayectoria promedio en un modelo a gran escala para cualquier separación arbitraria T-R es expresada como una función de distancia mediante el exponente de pérdida de trayectoria  $n$ , como se muestra en la ecuación 6.

$$\bar{P}_r(d) = P_r(d_0) \left( \frac{d}{d_0} \right)^{-n} \quad (5)$$

$$\bar{PL}(d)[dB] = \bar{PL}(d_0)[dB] + 10 n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (6)$$

Donde  $n$  indica la velocidad en la que la pérdida de trayectoria aumenta con la distancia y  $P_r(d_0)$  es la potencia recibida a una distancia de referencia  $d_0$  cercana a la antena transmisora [Frolik, 2007].

El valor de  $n$  es diferente en los diversos entornos: espacio libre  $n = 2$ , urbanos  $n = 2.7$  a  $3.5$ , en edificios línea de vista  $n = 1.6$  a  $1.8$ , edificios con obstrucciones  $n = 4$  a  $6$ , y fabricas  $n = 2$  a  $3$ . Para obtener un valor del exponente de pérdida de trayectoria  $n$  en una situación de emergencia, el prototipo se puso en funcionamiento en un ambiente externo en donde se tomaron mediciones de pérdida de potencia como se indica en [Frolik, 2007]. Para tener un entorno lo más parecido a una zona de desastre se optó por realizar las pruebas en un área con edificios en construcción como se muestra en la figura 3. Se instaló una estación base para proporcionar una red GSM en un punto específico y posteriormente se tomaron datos en diferentes puntos del área alrededor de la estación base como se muestra en la figura 4. Para la obtención de los datos se utilizó el analizador Tektronix RSA306 y para el posicionamiento un GPS etrex 20x. Los datos obtenidos se pos-procesaron en MatLab para obtener gráficas del comportamiento de la red utilizando aproximaciones de mínimos cuadrados para obtener el valor de  $n$ .



Figura 3 Pruebas de la Red GSM en el escenario de emergencia.



Figura 4 Puntos de medición en el escenario de emergencia.

## Área de cobertura

Para definir el área de cobertura útil que ofrece el sistema se considera un clúster circundante como se muestra en la figura 5. Entonces el PL puede ser muy diferente en dos lugares diferentes que tienen la misma separación T-R, por lo tanto, esto nos dice que señales medibles son muy diferentes al valor promedio. Las mediciones han demostrado que en cualquier valor de  $d$ , el  $PL(d)$  es aleatorio y está distribuido como una variable log-normal sobre el valor medio dependiente de la distancia.

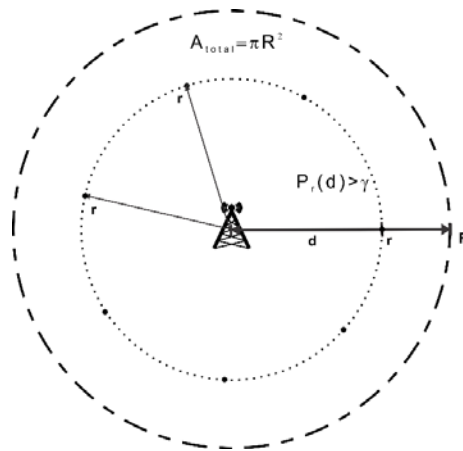


Figura 5 Área de cobertura útil de una celda circular.

Entonces se puede redefinir la pérdida de trayectoria mediante la ecuación 7.

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d) + X_\sigma \quad (7)$$

Donde  $X_\sigma$  es una variable aleatoria con distribución gaussiana con  $\mu = 0$  y varianza  $\sigma^2$ . La distribución log-normal describe los efectos aleatorios de sombreado o *shadowing* que se producen en un gran número de ubicaciones, medidas que tienen la misma separación T-R, pero que tienen diferentes niveles de  $PL$ . A este fenómeno se le conoce como efecto Log-Normal *shadowing*. Esto quiere decir que log-normal *shadowing* implica que los niveles de señal medidos en una separación T-R específica, tienen una distribución normal o gaussiana sobre la media dependiente de la distancia como se muestra en la ecuación 7. Ya que el  $PL(d)$  es una variable aleatoria con distribución normal dependiente de una distancia media, entonces, la potencia recibida a una distancia  $d$  del transmisor  $PR(d)$  y la función  $Q$  (o función

de error,  $erf$ ) definida por la ecuación 8, pueden ser utilizadas para determinar la probabilidad de que el nivel de potencia de la señal recibida exceda un umbral  $\gamma$  en particular como se ve en la figura 6, todo esto con el fin de encontrar el área de cobertura que ofrece un sistema de radio móvil.

$$Q(z) = \frac{1}{2\pi} \int_z^{\infty} e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \left[ 1 - erf\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (8)$$

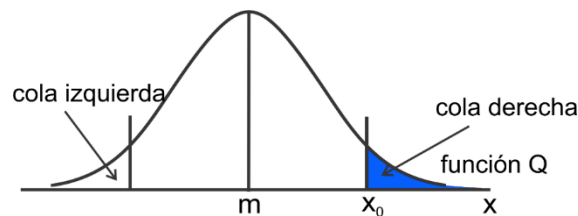


Figura 6 Función de densidad de probabilidad Gaussiana.

Entonces a partir de la figura 5 en donde la cobertura de un área circular que tiene un radio  $R$  desde una estación base hacia el borde de la celda, donde se deja un umbral  $\gamma$  deseado de señal recibida, nos interesa calcular el porcentaje de área de servicio útil  $U(\gamma)$  descrita por la ecuación 9, es decir, el porcentaje de área con una potencia de señal recibida que es igual o mayor que  $\gamma$ , dada la probabilidad de cobertura en el borde de la celda. Teniendo  $d = r$  que es la distancia radial desde la antena transmisora,  $prob[Pr(d) > \gamma]$  es la probabilidad que la señal aleatoria recibida en  $d = r$  excede el umbral  $\gamma$  dentro de un área incremental  $dA$ , como se muestra en las ecuaciones 10 y 11, donde puede ser calculada con la función de densidad acumulada (CDF), partiendo que la  $Pr(d)$  se comporta como una variable aleatoria con distribución gaussiana.

$$U(\gamma) = \frac{1}{\pi R^2} \int_A prob[Pr(d) > \gamma] dA = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R prob[Pr(d) > \gamma] r dr d\theta \quad (9)$$

$$prob[Pr(d) > \gamma] = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{\gamma}^{\infty} e^{-\frac{(Pr(d) - \bar{Pr}(d))^2}{2\sigma^2}} dPr(d) \quad (10)$$

$$prob[Pr(d) > \gamma] = Q\left(\frac{\gamma - \bar{Pr}(d)}{\sigma}\right) = \frac{1}{2} \left[ 1 - erf\left(\frac{\gamma - \bar{Pr}(d)}{\sigma\sqrt{2}}\right) \right] \quad (11)$$

Por lo tanto, el porcentaje de área de cobertura útil que ofrece el sistema de comunicación se calcula por medio del desarrollo en las ecuaciones 12, 13 y 14, y finalmente es definido por la ecuación 15.

$$\begin{aligned} \text{prob}[P_r(d) > \gamma] &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - \bar{P}_r(d)}{\sigma\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - (P_r(d) - PL(d))}{\sigma\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - \left[ P_t(d) - \left( \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{r}{d_0} \right) \right) \right]}{\sigma\sqrt{2}} \right) \\ &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \text{erf} \left( \frac{\gamma - P_t(d) + \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{R}{d_0} \right) + \frac{10n \log \left( \frac{r}{R} \right)}{\sigma\sqrt{2}}}{\sigma\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

Tomando:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\gamma - P_t + \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left( \frac{R}{d_0} \right)}{\sigma\sqrt{2}} \quad y \quad b = \frac{10n \log(e)}{\sigma\sqrt{2}} \\ \text{prob}[P_r(d) > \gamma] &= \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{erf} \left( a + b \ln \left( \frac{r}{R} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

Evaluando:

$$U(\gamma) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \left[ 1 - \text{erf} \left( a + b \ln \left( \frac{r}{R} \right) \right) \right] \right) r dr d\theta \quad (14)$$

$$(\gamma) = \frac{1}{2} \left( 1 - \text{erf}(a) + \exp \left( \frac{1 - 2ab}{b^2} \right) \right) \left[ 1 - \text{erf} \left( \frac{1 - ab}{b} \right) \right] \quad (15)$$

### Análisis de capacidad de la red

El sistema de radio celular depende del enlace troncal para acomodar una gran cantidad de usuarios en un espectro de radio limitado. El *Trunking* o troncalización es un sistema dinámico de asignación de canal, es decir, las decisiones sobre la asignación de frecuencia son realizadas automáticamente por un centro de control y un conmutador o *switch* computarizado. Para realizar estimaciones de capacidad en un sistema troncalizado es necesario conocer tomar en cuenta múltiples variables importantes como: el número total de usuarios  $U$  a los que se les brindará

el servicio, el número total de canales  $C$  ofrecidos por el sistema, la intensidad de tráfico  $A$  que lleva el sistema, la duración promedio de una llamada telefónica  $H$  en segundos, la probabilidad de que una llamada sea bloqueada, el grado de servicio (GOS), y la tasa de Solicitud, que es el número promedio de solicitudes de llamadas por usuario por unidad de tiempo, se denota por  $\lambda$  en unidades de *segundos*<sup>-1</sup>. A continuación se analizará el comportamiento en un sistema de telefonía celular, teniendo como principal interés conocer la probabilidad de que una llamada no pueda ser atendida por el sistema, es decir que sea bloqueada. Primero es necesario conocer la intensidad de tráfico ofrecido por un usuario, así como la intensidad de tráfico existente en el sistema, definidos por las ecuaciones 16 y 17 respectivamente. Además, para un sistema troncal con  $C$  canales, si el tráfico se distribuye equitativamente entre los canales, la intensidad de tráfico ofrecido por canal se define por la ecuación 18.

$$A_U = \lambda H \quad (16)$$

$$A = UA_U \quad (17)$$

$$A_C = \frac{UA_U}{C} \quad (18)$$

Para este análisis se utiliza la fórmula de Erlang B definida en la ecuación 19, que determina la probabilidad de que una llamada sea bloqueada, y es una medida del GOS para un sistema troncalizado que no proporciona una cola para llamadas bloqueadas.

$$Prob[bloqueo] = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GOS \quad (19)$$

### 3. Resultados

Para realizar el análisis numérico de la red celular en MatLab se considera que el prototipo cuenta con un total de 7 canales disponibles para ofrecer servicio a los usuarios, es configurado para trabajar en la frecuencia GSM de los 900 MHz y una potencia de transmisión de 100 mW.



## Exponente de pérdida de trayectoria en escenarios de emergencia

Las figuras 7 y 8 muestran la pérdida de potencia recibida, obtenidas numéricamente en un ambiente real fuera de laboratorio, respectivamente. Estos resultados se utilizan para calcular, a través de aproximaciones de mínimos cuadrados, un valor de  $n$  en un escenario de emergencia.

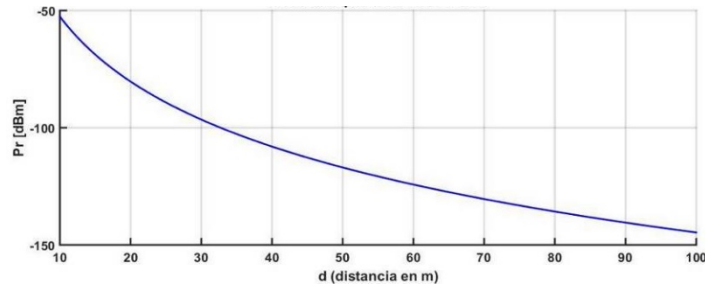


Figura 7 Análisis numérico de la pérdida de potencia con  $P_t = 0.1 W$ .

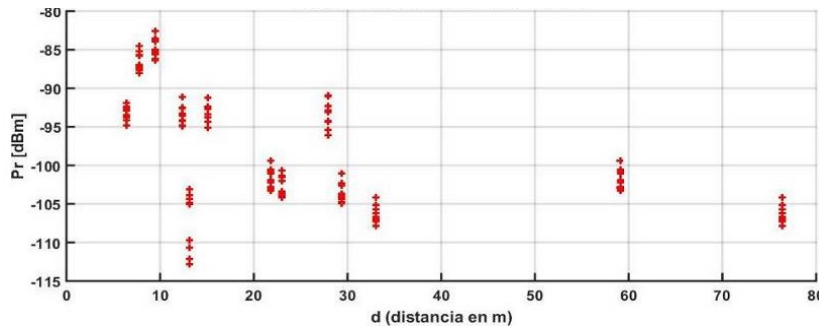


Figura 8 Pérdida de potencia en el escenario de emergencias bajo evaluación.

En la figura 9 se muestra el resultado en donde  $n = 2.9413$  y  $\sigma = 4.3391 dB$ . En la figura 10 se muestra el modelo de pérdida de trayectoria con valores de  $n = 4$  y  $d_0 = 10 m$  para el análisis numérico, y  $n = 2.9413$  para el análisis en un ambiente real, el radio total de la celda es de 100 y 78 metros respectivamente.

## Área de cobertura de la red

Para el cálculo de las áreas de cobertura mostradas en las figuras 11 y 12 se definió una probabilidad de umbral del 20% ( $\gamma = 0.2$ ) y una sensibilidad del receptor de  $-115 dBm$ . Para el análisis numérico se tomó un valor de  $n = 4$  y  $\sigma = 9 dB$ , mientras que para las mediciones reales de  $n = 2.9413$  y  $\sigma = 4.3391 dB$ .

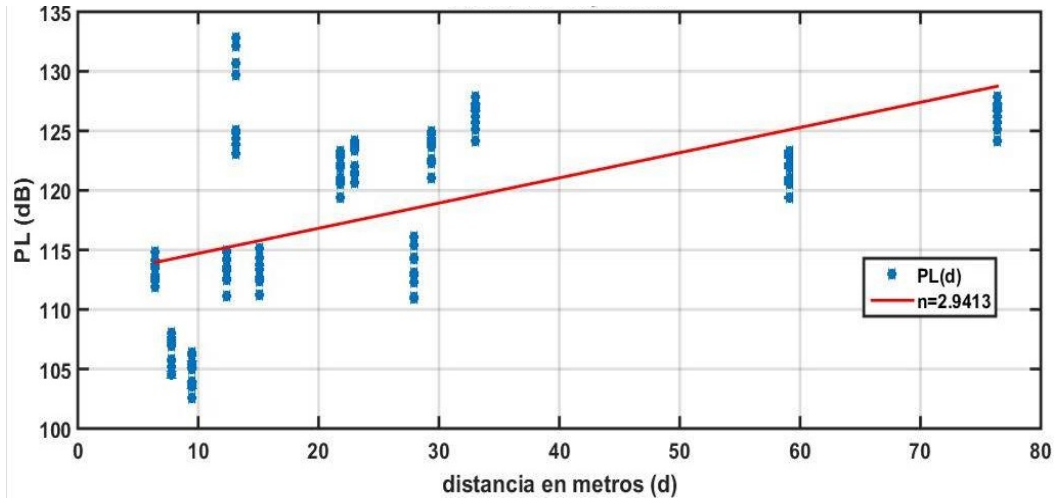


Figura 9 Pérdida de trayectoria en el escenario de emergencias bajo evaluación.

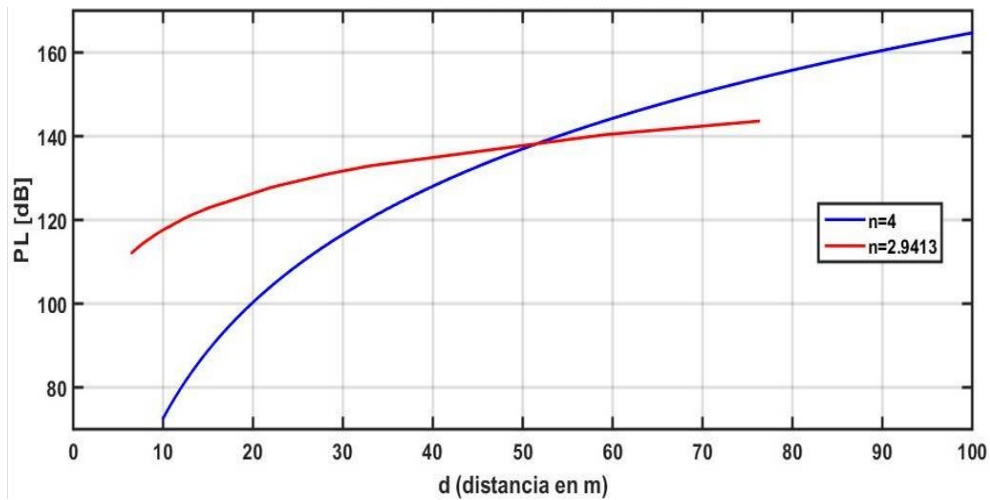


Figura 10 Modelo de pérdida de trayectoria.

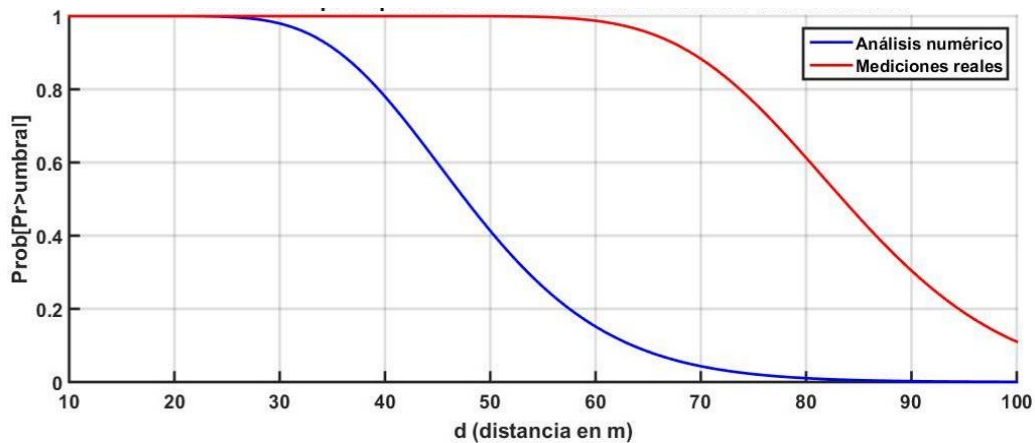


Figura 11 Probabilidad de que  $P_r$  sea mayor a un umbral a una distancia  $d$  ( $P_r > \gamma$ ).

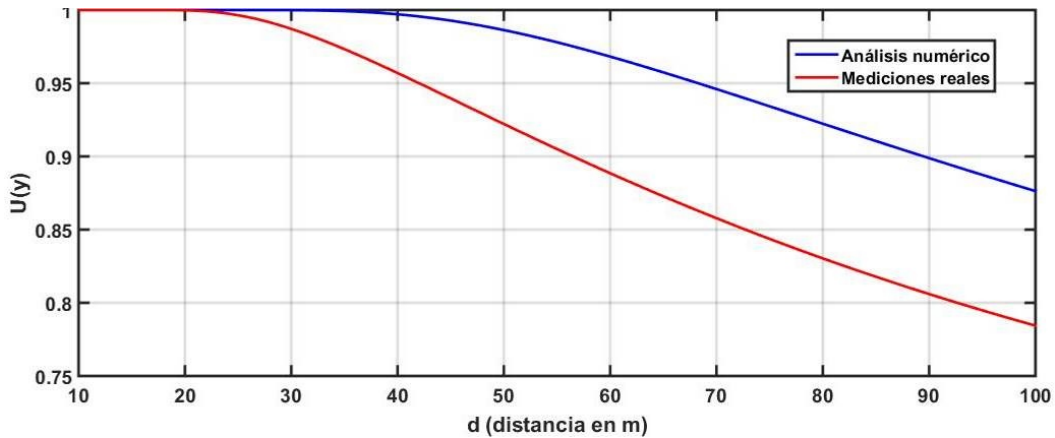


Figura 12 Porcentaje del área de cobertura útil.

### Capacidad de la red

Se plantearon diferentes escenarios con casos específicos tomando en cuenta la probabilidad de bloqueo, número máximo de usuarios a los que se les brinda el servicio, total de canales disponibles en el sistema, y la duración promedio de una llamada telefónica. En la figura 13 se muestra el análisis del comportamiento del sistema actual, sabiendo ofrece hasta 7 canales disponibles, se encuentra el número máximo de usuarios que se pueden atender en 1 hora, suponiendo que una llamada tiene una duración promedio de  $H$  minutos y una probabilidad de bloqueo del 5%. Es importante mencionar que una llamada de emergencia tiene una duración de aproximada de 1 minuto.

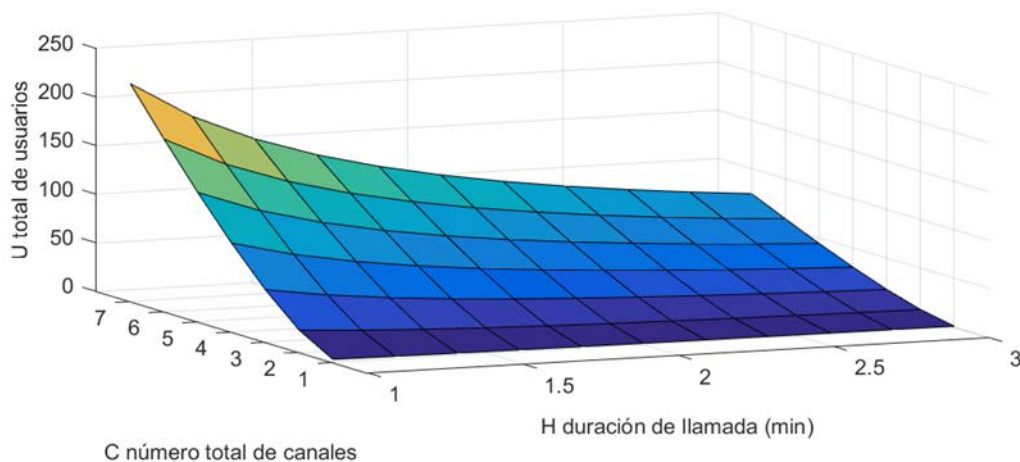


Figura 13 Modelo de Análisis de tráfico, con  $prob[bloqueo] = 5\%$ .

En la figura 14 se muestra que con un sistema que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios con  $C$  canales disponibles, se determina cual es la probabilidad de bloqueo del sistema, suponiendo que una llamada tiene duración promedio de  $H=3$  minutos y que los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora.

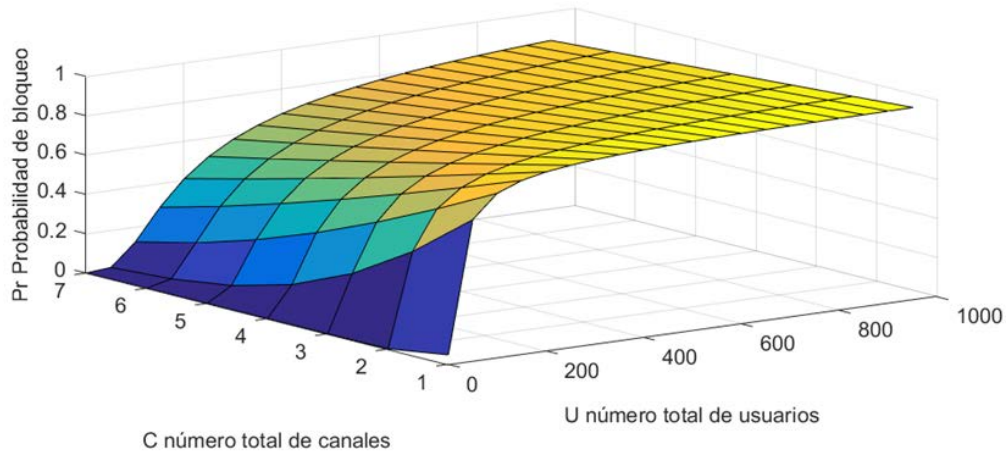


Figura 14 Modelo de Análisis de tráfico con  $C$  canales y  $H = 3$ .

Al igual que en el caso anterior, en la figura 15 se muestra que con un sistema que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios, pero nos interesa conocer el número de canales disponibles  $C$ , para satisfacer la demanda de llamadas de la población, considerando la probabilidad de bloqueo del sistema,  $H=3$  minutos y los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora.

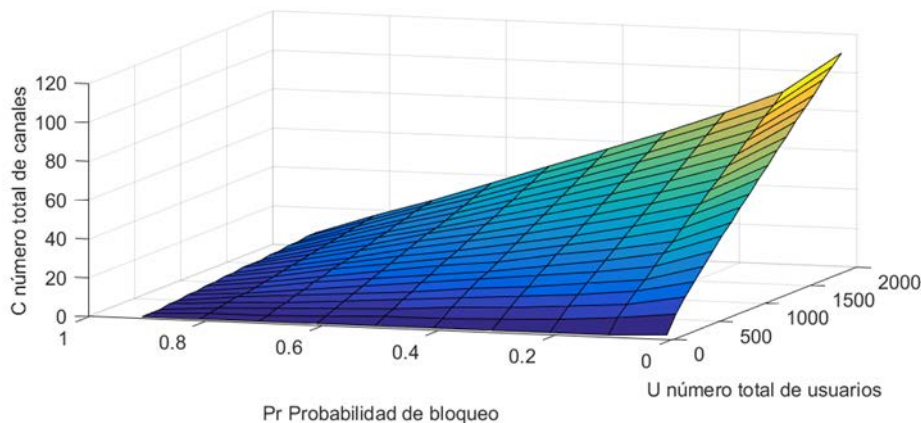


Figura 15 Modelo de Análisis de tráfico con  $P_r$  y  $H = 3$ .

#### **4. Discusión**

En las gráficas de las figuras 7 a 10 se observa que la potencia recibida disminuye respecto a la distancia, por lo tanto, la pérdida de trayectoria aumenta con la distancia hasta llegar a un punto en donde la señal se pierde y se obtiene solamente ruido. En el análisis de área de cobertura mostradas por las gráficas de las figuras 11 y 12 podemos observar que cuando la antena receptora se aleja a una distancia  $d$  del transmisor la probabilidad de que la potencia recibida sea mayor que el umbral (sensibilidad del receptor) es menor, por lo tanto el área de cobertura útil en un sistema de telefonía es mayor cuando la distancia T-R es menor, ya que se logra tener buenos niveles de recepción cubriendo la mayor parte del área a la que se brinda servicio.

Por último para el análisis de tráfico es necesario tomar en cuenta múltiples variables es por ello que para tener un mejor entendimiento se definieron 3 escenarios diferentes: En el primer caso que se muestra en la gráfica de la figura 13, se tiene un sistema de telefonía con  $C$  canales disponibles y una probabilidad de bloqueo del 5%, es posible encontrar el número máximo de usuarios que se pueden atender en 1 hora con la red que proporciona actualmente el prototipo, suponiendo que una llamada tiene una duración promedio de  $H$  minutos, en la gráfica se puede ver que usando los 7 canales y con una duración de llamada de 1 minuto que es lo que en promedio dura una llamada de emergencia, se puede atender solamente a máximo 200 usuarios aproximadamente; es un número relativamente bajo por tanto es necesario aumentar esa población. Entonces llegamos al segundo caso mostrado por la gráfica de la figura 14 en donde teniendo un sistema de telefonía que brinda servicio a una población de mayor de usuarios con hasta 7 canales disponibles, se determina cual es la probabilidad de bloqueo del sistema, suponiendo que una llamada tiene duración promedio de 3 minutos y que los usuarios solamente intentan realizar una llamada por hora. Aquí se presenta un grave problema ya que la probabilidad de que una llamada sea bloqueada aumenta por tanto la mayoría de los usuarios no podrán ser atendidos por la red, una solución para esto es aumentar el número de canales que ofrece el sistema. Finalmente, en el tercer caso que nos presenta la gráfica de la figura 15 nos dice que teniendo un

sistema de telefonía que brinda servicio a una población de  $U$  usuarios con una probabilidad de bloqueo de  $Pr$ , podemos determinar cuál es el número de canales disponibles  $C$  que se necesitan que ofrezca el sistema para que pueda satisfacer la demanda de llamadas de la población, suponiendo que una llamada telefónica tiene una duración promedio de 3 minutos.

## 5. Conclusiones

Se implementó una estación base de telefonía celular GSM que puede ser utilizada por los equipos de rescate y protección civil en situaciones de emergencia. Los conceptos de las redes celulares se utilizaron para caracterizar el prototipo desarrollado en este trabajo. Se realizaron pruebas controladas en laboratorio para obtener un análisis específico del funcionamiento de la red, para identificar los requerimientos necesarios para un óptimo funcionamiento que pueda brindar un buen servicio a los usuarios en un ambiente real de emergencia. Se realizó un análisis numérico en MatLab del prototipo, para obtener un estudio de pérdida de trayectoria, análisis de cobertura y análisis de tráfico, para visualizar el comportamiento del sistema y determinar los requerimientos necesarios para un óptimo funcionamiento en un entorno real. Además, se obtuvo experimentalmente el coeficiente de pérdida de trayectoria en un escenario similar a una situación de emergencia, donde se probó además el funcionamiento de la estación base celular. De estas pruebas se determinó la factibilidad de utilizar el prototipo en los escenarios propuestos, ya que el tiempo de levantamiento de la red fue de apenas 20 minutos.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] A. Mauthe et al., Disaster-resilient communication networks: Principles and best practices, in 2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM), pp. 1-10, Sept 2016.
- [2] D. Lara and D. Muñoz and S. Rosas, *Sistemas de comunicación móvil*, Alfaomega, 1995.
- [3] D. Muñoz, *Sistemas inalámbricos de comunicación personal*, Alfaomega, 2002.

- [4] Ledema Michael, *Getting Started with OpenBTS: BUILD OPEN SOURCE MOBILE NETWORKS*, Foreword by Harvind Samra, Published by O'Reilly Media, Inc., First Edition, Jan 2015.
- [5] J. Frolik, Implementation of Handheld, RF Test Equipment in the Classroom and the Field, in *IEEE Transactions on Education*, vol. 50, no. 3, pp. 182-187, Aug 2007.
- [6] K. Namuduri, When disaster strikes, Fying cell towers could aid search and rescue, Aug 29, 2017. *IEEE Spectrum*.
- [7] Pinar D. I., Murillo F. J., *Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software*, Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad de Sevilla, Primera Edición, 2011.
- [8] R. Ferrus, O. Sallent, G. Baldini and L. Goratti, Public Safety Communications: Enhancement Through Cognitive Radio and Spectrum Sharing Principles, in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 54-61, June 2012.
- [9] Theodore S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles Practice*, Prentice-Hall, Inc, Second Edition, 2001.

# **OBSERVADOR HÍBRIDO DE MODOS DESLIZANTES PARA EL CONTROL SENSORLESS DE UN MOTOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES**

*HYBRID SLIDING MODE OBSERVER FOR SENSORLESS  
CONTROL OF A PERMANENT-MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR*

***Daniel Memije Garduño***

Instituto Politécnico Nacional  
*daniel\_memije@hotmail.com*

***Oscar Carranza Castillo***

Instituto Politécnico Nacional  
*ocarranzac@ipn.mx*

***Jaime José Rodríguez Rivas***

Instituto Politécnico Nacional  
*jjrodriguezr@ipn.mx*

***Rubén Ortega González***

Instituto Politécnico Nacional  
*rortegag@ipn.mx*

## **Resumen**

En este artículo se propone un observador híbrido, el cual está constituido por un observador de Luenberger y un observador de modos deslizantes, ambos funcionando en paralelo para combinar las ventajas de ambas técnicas de observación. Debido a su naturaleza no lineal, este observador es usado para estimar la fuerza electromotriz de un motor síncrono de imanes permanentes, la cual contiene la información de la posición y velocidad. Esta fuerza electromotriz estimada es procesada digitalmente por un algoritmo PLL para estimar la posición y la velocidad del motor. Estas estimaciones son realimentadas en un esquema de control vectorial, con lo cual se elimina la necesidad del sensor mecánico de posición/velocidad (control sensorless). Simulaciones en MATLAB/Simulink son llevadas a cabo, donde se demuestra el correcto funcionamiento del observador propuesto. Finalmente, los resultados obtenidos son analizados y discutidos.



**Palabras claves:** *Control sensorless, motor síncrono de imanes permanentes, observador de modos deslizantes, SRF PLL.*

## **Abstract**

In this paper, a hybrid observer is proposed, which is constituted by a Luenberger observer and a sliding mode observer, both working in parallel, so to obtain the advantages of both observation techniques. Due to its nonlinear nature, this observer is used to estimate the back-electromotive force of a permanent magnet synchronous motor, which contains the rotor position and speed information. This estimated back-electromotive force is digitally processed by a PLL algorithm to estimate the motor position and speed. These estimates are feedback into a vector control scheme, where the need for the mechanical position/speed sensor (sensorless control) is eliminated. Simulations in MATLAB/Simulink are carried out, where the performance of the proposed observer is demonstrated. Finally, the results obtained are analyzed and discussed.

**Keywords:** *Permanent-magnet synchronous motor, Sliding mode observer, Sensorless control, SRF PLL.*

## **1. Introducción**

Un Motor Síncrono de Imanes Permanentes (MSIP) tiene diversas ventajas como son: su alta eficiencia, poca necesidad de mantenimiento, gran relación de par-inercia y alta eficiencia [Rivera, 2014]. Debido a esto, estos motores han sido acogidos en la industria. Por ejemplo, la gran mayoría de diseños actuales de sistemas de generación eólica usan esta máquina [Yaramasu, 2017].

Un sistema de control de alto desempeño de un MSIP, como lo es el control vectorial, requiere de la información precisa de la posición y la velocidad del rotor. Las investigaciones más recientes en control del MSIP han concentrado su atención en la eliminación del sensor mecánico de posición/velocidad (sensorless), debido a las ventajas que esto presenta, como son: complejidad de hardware reducida, menor costo, tamaño reducido del motor, mayor inmunidad al ruido electromagnético, mayor confiabilidad y menos mantenimiento [Holtz, 2002].

Convencionalmente, la información de posición/velocidad se obtiene mediante un encoder. Sin embargo, el uso de este tipo de sensores aumenta el costo y la complejidad del sistema. Además, éstos son sensibles a vibraciones, cambios de temperatura y ruido electromagnético. Para superar todas estas desventajas, diversas estrategias de control sensorless del MSIP han sido propuestas en los últimos años [Liu, 2014]. Estas estrategias, que obtienen la información la posición del rotor a través de mediciones eléctricas, son divididas en dos ramas:

- Técnicas sensorless basadas en el modelo dinámico del MSIP: La información de la posición y la velocidad del motor es obtenida a partir de la estimación de la Fuerza ElectroMotriz (FEM) interna del MSIP. Estos métodos son sencillos de implementar, pero no se desempeñan bien a bajas velocidades ya que bajo estas condiciones la FEM es pequeña y difícil de estimar [Vasilios, 2009].
- Técnicas sensorless basadas en la anisotropía del rotor. – En estos esquemas se aprovecha la no uniformidad del flujo magnético del rotor. La posición del rotor se detecta a partir de la medición de corrientes resultantes de la inyección de una señal de alta frecuencia.

Las técnicas son difíciles de implementar, pero son eficaces a cero y bajas velocidades [Tüysüz, 2012]. Las dos estrategias de control sensorless pueden ser combinadas en un sistema de control sensorless de alto desempeño que permite el funcionamiento del MSIP en todo el rango de velocidades. Sin embargo, estos sistemas incrementan la complejidad del sistema de control [Shin, 2016]. El sistema de control sensorless propuesto se basa en la observación de la FEM interna del MSIP, la cual es procesada digitalmente para obtener la información de posición/velocidad. El esquema de observación propuesto únicamente es válido para trabajar a velocidad media y alta. Sin embargo, el observador propuesto es fácil implementar debido a su sencillez. Además de que combina las ventajas de un observador de lineal y un observador de modos deslizantes. También minimiza los efectos negativos del ruido en las estimaciones (chattering), causado por la no linealidad del observador de modos deslizantes.

## 2. Métodos

### Modelo matemático del MSIP

El modelo general del MSIP [Glumineau, 2015] viene dado por la ecuación 1.

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \mathbf{I}_{abc} + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{abc} \quad (1)$$

donde  $R_s$  es la resistencia del estator,  $\mathbf{V}_{abc}$  es el vector de voltaje aplicado en los bornes del motor,  $\mathbf{I}_{abc}$  es el vector de corrientes, y  $\boldsymbol{\Psi}_{abc}$  es el vector de flujo magnético. Existen dos fuentes de flujo magnético: el flujo magnético debido a la inductancia del estator ( $\Psi_L$ ) y el flujo magnético de los imanes permanentes del rotor ( $\Psi_M$ ), los cuales son expresados en la ecuación 2.

$$\Psi_L = L_s \vec{I}_{abc}; \quad \Psi_L = \Psi \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} := \Psi [\cos\theta_{abc}] \quad (2)$$

Donde  $L_s$  es la inductancia del estator,  $\Psi$  es el flujo magnético nominal del rotor,  $\theta_e$  es la posición del rotor y  $[\cos\theta_{abc}]$  es el vector que representa la interacción entre el flujo magnético de los imanes del rotor y los devanados del estator, tal como se muestra en la figura 1. El flujo magnético del rotor induce una FEM en cada devanado del estator, la cual depende de la posición del rotor (figura 1a) y Cada devanado del estator está separados  $2\pi/3$  radianes (figura 1b). Basado en la ecuación 2, la derivada de  $\boldsymbol{\Psi}_{abc}$  en la ecuación 1 está dada por la ecuación 3.

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_{abc} = -\omega_e \Psi [\sin\theta_{abc}]; \quad \text{donde } \omega_e = \frac{d}{dt} \theta_e \quad (3)$$

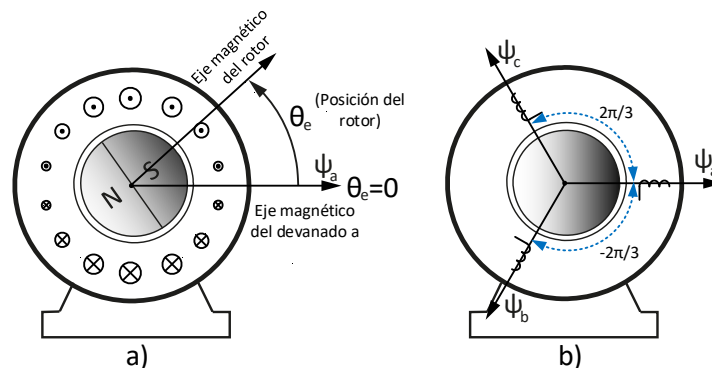


Figura 1 Interacción entre el rotor y el estator.

Donde  $\omega_e$  es la frecuencia, en radianes por segundo, de las corrientes del MSIP. Al combinar las ecuaciones 1 y 3 se obtiene el modelo  $abc$  del MSIP, dado por la ecuación 4.

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \mathbf{I}_{abc} + L_s \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{abc} + \mathbf{E}_{abc} \quad (4)$$

Donde  $\mathbf{E}_{abc}$  es el vector trifásico de la FEM interna del motor, expresada en la ecuación 5.

$$\mathbf{E}_{abc} = -\omega_e \Psi [\mathbf{sen} \boldsymbol{\theta}_{abc}] \quad (5)$$

Observe como la FEM contiene la información de la posición y la velocidad del motor. Sin embargo, es difícil obtener esta información a partir de la ecuación 5. Por esta razón, el modelo del MSIP, dado por la ecuación 4, es llevado al marco de referencia  $\alpha\beta$  mediante la aplicación de la transformada de Clark de potencia constante [Mohan, 2014], obteniendo la ecuación 6.

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta} = R_s \mathbf{I}_{\alpha\beta} + L_s \frac{d}{dt} \mathbf{I}_{\alpha\beta} + \mathbf{E}_{\alpha\beta} \quad (6)$$

Donde  $R_s$  y  $L_s$  son la resistencia y la inductancia del estator, respectivamente,  $\mathbf{V}_{\alpha\beta}$  el vector de tensiones en los bornes del MSIP,  $\mathbf{I}_{\alpha\beta}$  vector de corrientes del estator, y  $\mathbf{E}_{\alpha\beta}$  vector de la FEM, el cual es expresado en la ecuación 7.

$$\mathbf{E}_{\alpha\beta} = \mathbf{j} \sqrt{3/2} \omega_e \Psi \boldsymbol{\theta}_{\alpha\beta} = \sqrt{3/2} \omega_e \Psi \begin{bmatrix} -\mathbf{sen}(\theta_e) \\ \mathbf{cos}(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde  $\mathbf{j} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$  y  $\boldsymbol{\theta}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -\mathbf{cos}(\theta_e) \\ \mathbf{sin}(\theta_e) \end{bmatrix}$  se definen mediante la ecuación 8.

$$\mathbf{j} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ y } \boldsymbol{\theta}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} -\mathbf{cos}(\theta_e) \\ \mathbf{sin}(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (8)$$

El término " $\mathbf{j} \sqrt{3/2} \boldsymbol{\theta}_{\alpha\beta}$ " en la ecuación 7 es la transformada de Clark de " $-\mathbf{sen} \boldsymbol{\theta}_{abc}$ " en la ecuación 4, donde la constante  $\sqrt{3/2}$  es a consecuencia del uso de la transformada de Clark de potencia constante [Glumineau, 2015]. El modelo

dado por la ecuación 7 es más útil que la ecuación 5, ya que la posición y la velocidad del MSIP son obtenidas fácilmente a partir de éste. Sin embargo, debido a que la FEM no es un parámetro que pueda ser medido directamente, es necesario medirlo de manera indirecta, mediante un observador.

### Diseño del observador de la FEM

El diseño del observador de FEM se basa en el modelo  $\alpha\beta$  del MSIP dado por la ecuación 6, expresado en forma matricial mediante la ecuación 9.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \left( \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \right) \quad (9)$$

Donde los modelos  $\alpha$  y  $\beta$  son dos ecuaciones de primer orden, idénticas e independientes. Para tomar ventaja de estas propiedades, el observador propuesto se diseñará solo para el eje  $\alpha$ , tal y como se expresa en la ecuación 10.

$$\frac{d}{dt} I_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} I_\alpha + \frac{1}{L_s} (V_\alpha - E_\alpha) \quad (10)$$

Debido a la simetría entre los ejes  $\alpha$  y  $\beta$  en la ecuación 9, las ganancias obtenidas para el eje  $\alpha$  serán idénticas a las del eje  $\beta$ . Observe que la FEM en la ecuación 10 aparece como una perturbación, por lo tanto, para reconstruir a ésta se propone el siguiente observador general mediante la ecuación 11.

$$\frac{d}{dt} \hat{I}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} \hat{I}_\alpha + \frac{1}{L_s} (V_\alpha - u_\alpha) \quad (11)$$

Donde  $\hat{I}_\alpha$  es la corriente estimada,  $V_\alpha$  es la tensión medida en los bornes del MSIP y  $u_\alpha$  es el término de corrección. En forma particular, el observador propuesto está dado por la ecuación 12.

$$\frac{d}{dt} \hat{I}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s} \hat{I}_\alpha + \frac{1}{L_s} [V_\alpha - k_p \sigma_\alpha - k_n \text{sign}(\sigma_\alpha)] \quad (12)$$

Donde  $k_p$  es la ganancia proporcional,  $k_n$  es la ganancia no lineal,  $\sigma_\alpha$  es la variable deslizante. La función  $\text{sign}(\sigma_\alpha)$  es igual a 1 cuando " $\sigma_\alpha \geq 0$ " y  $-1$  cuando " $\sigma_\alpha < 0$ ".

0". Para sistemas con orden relativo de uno, la variable deslizante  $\sigma_\alpha$  es expresada como el error del observador [Shtessel, 2015], dada por la ecuación 13.

$$\sigma_\alpha = e_\alpha = I_\alpha - \hat{I}_\alpha \quad (13)$$

La figura 2 presenta el diagrama de bloques del observador propuesto, donde se muestra cómo las ecuaciones 9, 12 y 13 están relacionadas. Se debe destacar que todas las variables acentuadas ( $\hat{\bullet}$ ) son estados estimados del motor.

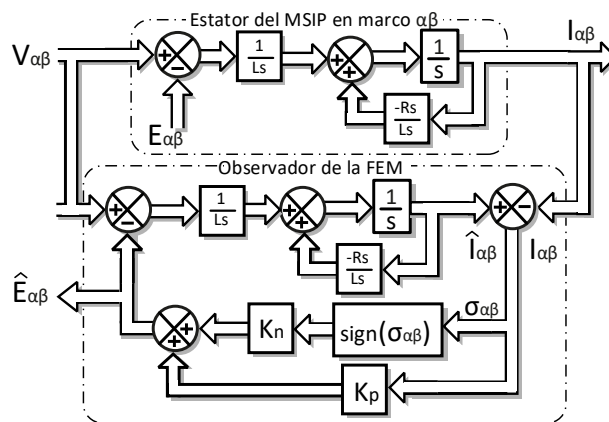


Figura 2 Observador híbrido para estimar la FEM interna del MSIP.

### Análisis de la estabilidad del observador lineal

Al restar la ecuación 10 de la ecuación 12, asumiendo que los términos no lineales y las perturbaciones son iguales a cero (es decir,  $k_n = E_\alpha = 0$ ), la dinámica lineal del error en el observador es expresada por la ecuación 14.

$$\frac{d}{dt} e_\alpha = - \left( \frac{R_s + k_p}{L_s} \right) e_\alpha \quad (14)$$

Donde la ganancia  $k_p$  que garantiza la estabilidad del observador, debe satisfacer la ecuación 15.

$$\frac{R_s + k_p}{L_s} > 0 \Rightarrow k_p > -R_s \quad (15)$$

La ecuación 14 es una ecuación diferencial de primer orden, por lo tanto, su estabilidad está dictada por un solo eigenvalor ( $\omega_c$ ), expresado mediante la ecuación 16.

$$\frac{R_s + k_p}{L_s} = \omega_c \Rightarrow k_p = \omega_c L_s - R_s \quad (16)$$

Donde  $\omega_c$  es conocida como la frecuencia de cruce o constante de tiempo del sistema, la cual está dada en radianes por segundo.

### Análisis de la estabilidad del observador no lineal

De acuerdo con Lyapunov, un sistema con disipación continua de energía eventualmente llegará a un punto de equilibrio [Shtessel, 2015]. Por lo tanto, la ganancia  $k_i$  que garantiza la estabilidad de la ecuación 12 es obtenida mediante el análisis de estabilidad cuadrática, usando la ecuación de Lyapunov, dada por la ecuación 17.

$$F = \frac{1}{2} \sigma_\alpha^2 \quad (17)$$

Para demostrar la estabilidad del sistema, la función de Lyapunov debe ser continua, definida positiva (es decir:  $\lim_{|\sigma_\alpha| \rightarrow \infty} F = \infty$ ), y su nivel de energía debe desvanecerse con el tiempo (es decir:  $dF/dt < 0$ ) [Shtessel, 2015].

Como una función cuadrática es definida positiva, para garantizar la estabilidad en términos de Lyapunov, es suficiente garantizar que su derivada con respecto del tiempo es negativa. Esto se lleva a cabo tomando la derivada de la ecuación 17, lo que resulta en la ecuación 18.

$$F = \sigma_\alpha \frac{d}{dt} \sigma_\alpha = \sigma_\alpha \left( \frac{d}{dt} \hat{I}_\alpha - \frac{d}{dt} I_\alpha \right) \quad (18)$$

Substituyendo las ecuaciones 10 y 12 en la ecuación 18 asumiendo que  $k_p$  es igual con cero, se obtiene la ecuación 19.

$$\frac{d}{dt} F = \sigma_\alpha \left[ -\frac{R_s}{L_s} \hat{I}_\alpha + \frac{1}{L_s} (V_\alpha - k_p \sigma_\alpha - k_n \text{sign}(\sigma_\alpha)) + \frac{R_s}{L_s} I_\alpha - \frac{1}{L_s} (V - E_\alpha) \right] \quad (19)$$

Mediante la simplificación de la ecuación 19 se obtiene la ecuación 20.

$$\frac{d}{dt} F = \sigma_\alpha \left[ -\left( \frac{R_s + k_p}{L_s} \right) \sigma_\alpha + \frac{E_\alpha - k_n \text{sign}(\sigma_\alpha)}{L_s} \right] \quad (20)$$

La estabilidad del observador está garantizada si y solo si la ecuación 20 es estrictamente negativa. Para este fin, en la literatura se propone usar una condición más fuerte llamada “condición de existencia” [Shtessel, 2015], dada por la ecuación 21.

$$F < -\frac{\rho}{\sqrt{2}}|\sigma_\alpha| \quad (21)$$

donde  $\frac{\rho}{\sqrt{2}}$  (con  $\rho > 0$ ) determina el tiempo de asentamiento del observador no lineal. Asumiendo que la FEM y derivada del error está acotados, se obtiene ecuación 22.

$$|(R_s + k_p)\sigma_\alpha| < S_{error} \quad \text{y} \quad |E_\alpha| < k_e\omega_{nom} \quad (22)$$

Y al sustituir las ecuaciones 22 y 21 en la ecuación 20, se obtiene la ecuación 23.

$$F = |\sigma_\alpha| \frac{1}{L_s} \left[ -S_{error} + k_e\omega_n(\sigma_\alpha)_{max} \left[ \frac{\rho}{\sqrt{2}}|\sigma_\alpha| \right] \right] \quad (23)$$

Finalmente, la ganancia integral  $k_n$  que garantiza la convergencia asintótica del error del observador a cero, debe cumplir la ecuación 24.

$$k_i > \frac{L_s\rho}{\sqrt{2}} + k_e\omega_{nom} - S_{error} \quad (24)$$

Como se observa en la ecuación 24, debido al signo negativo de  $S_{error}$  la inclusión del observador lineal incrementa el rango de compensación de perturbaciones del observador de modos deslizantes. El efecto de la variable de alcance  $\rho$  es despreciable, debido a que se multiplica con el parámetro  $L_s$ . Por lo tanto, la condición de estabilidad puede ser aproximada mediante  $k_i > k_e\omega_{nom}$ , que es el valor máximo de la FEM interna del MSIP. Por lo tanto, a partir de la constante eléctrica  $k_e$  y la velocidad máxima del motor  $\omega_{nom}$  se garantiza que el observador será capaz de compensar la FEM para todo el rango de velocidades del MSIP.

### Atenuación del rizado en la estimación

Los observadores de modos deslizantes de primer orden sufren de un fenómeno conocido como chattering, que es básicamente el rizado en las estimaciones, debido a la conmutación rápida del término de corrección del observador [Rivera, 2014]. Para eliminar esta fuente de ruido, en este trabajo se propone sustituir la función



discontinua  $sign(\bullet)$  en la ecuación 12 por su equivalente continuo, la función  $sigmoid(\bullet)$ . Esto se realiza con el fin de evitar el uso de un filtro pasa bajas, evitando así retrasos de fase en la estimación [Shtessel, 2014]. El observador modificado es expresado mediante la ecuación 25.

$$\frac{d}{dt}\hat{I}_\alpha = -\frac{R_s}{L_s}\hat{I}_\alpha + \frac{1}{L_s}\left[V_\alpha - k_p\sigma_\alpha - k_n\frac{\sigma_\alpha}{|\sigma_\alpha| + \delta}\right] \quad (25)$$

Donde ( $\delta > 0$ ) es la constante de la función sigmoid, la cual eliminar el rizado en las estimaciones. Sin embargo, esta aproximación deteriora las propiedades robustas de modos deslizantes, aunque este efecto es despreciable.

### Estimación de la posición y la velocidad usando un PLL

Para obtener la posición y la velocidad a partir de la FEM estimada se propone usar un Lazo de Localización de Fase en Marco de Referencia Síncrono (SRF-PLL por sus siglas en inglés), ya que éste tiene la propiedad de rechazar el ruido de alta frecuencia en las estimaciones de la FEM [Carranza, 2011]. El diagrama del SRF-PLL empleado se muestra en la figura 3, donde la velocidad se obtiene exclusivamente del término integral, ya que la componente proporcional solo contribuye con ruido de alta frecuencia. Los vectores  $E_{\alpha\beta}$  y  $\theta_{\alpha\beta}$  están dados por las ecuaciones 7 y 8, el parámetro  $s$  es el operador de Laplace,  $k_{pPLL}$  y  $k_{iPLL}$  son las ganancias del controlador Proporcional Integral (PI) del PLL y  $p$  es el número de polos del MSIP. La realimentación no lineal del PLL es expresada por la ecuación 26.

$$\frac{-\hat{E}_{\alpha\beta} \cdot \hat{\theta}_{\alpha\beta}}{\|\hat{E}_{\alpha\beta}\|} = \frac{-\hat{E}_\alpha \cdot \cos(\hat{\theta}_e) - \hat{E}_\beta \cdot \text{sen}(\hat{\theta}_e)}{\sqrt{\hat{E}_\alpha^2 + \hat{E}_\beta^2}} \quad (26)$$

Donde  $\hat{E}_\alpha$  y  $\hat{E}_\beta$  son las componentes  $\alpha\beta$  de la FEM y  $\hat{\theta}_e$  es la posición estimada del rotor. Sustituyendo las ecuaciones 7 y 8 en la ecuación 26 da como resultado la ecuación 27.

$$\frac{-\hat{E}_{\alpha\beta} \cdot \hat{\theta}_{\alpha\beta}}{\|\hat{E}_{\alpha\beta}\|} = \frac{\sqrt{3/2}\omega_e\Psi[\text{sen}(\theta_e) \cdot \cos(\hat{\theta}_e) - \cos(\theta_e) \cdot \text{sen}(\hat{\theta}_e)]}{|\sqrt{3/2}\omega_e\Psi|} \quad (27)$$

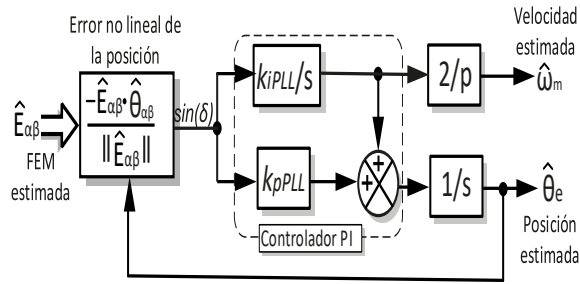


Figura 3 SRF-PLL utilizado para extraer la velocidad/posición de la FEM.

La normalización de FEM en la ecuación 27 permite que los polos de la función de transferencia del PLL sean constantes a cualquier velocidad del MSIP. Al asumir que la posición estimada está constituida por la posición real más un error (es decir:  $\hat{\theta}_e = \theta_e + \delta$ ), se obtiene la función de error de la posición del rotor, dada mediante la ecuación 28.

$$\text{sen}(\theta_e) \cdot \text{cos}(\theta_e + \delta) - \text{cos}(\theta_e) \cdot \text{sen}(\theta_e + \delta) = \text{sen}(\delta) \quad (28)$$

Suponiendo que este error es pequeño (es decir:  $\delta \approx 0$ ), se obtiene el modelo linealizado de SRF-PLL, como se muestra en la figura 4.

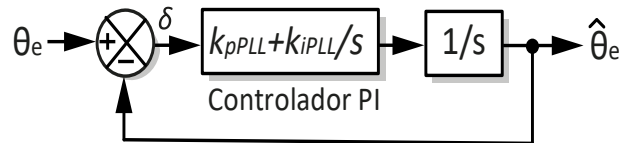


Figura 4 Diagrama de bloques del SRF-PLL linealizado.

### 3. Resultados

A continuación, se presentan resultados de simulación obtenidos en MATLAB/Simulink®. Los modelos de simulación desarrollados son mostrados por la figura 5. La figura 5a muestra las transformadas de Clark de corriente y tensión del MSIP con sus respectivos filtros pasa bajas, la figura 5b muestra la estimación de la posición/velocidad del motor, la figura 5c muestra el observador de la FEM, la figura 5d muestra el sistema de control del MSIP, la figura 5e muestra el módulo PWM y la figura 5f muestra el MSIP con su accionamiento conmutado a 20 kHz. Todo el sistema de control está programado en base al diagrama de control vectorial sensorless mostrado por la figura 6.

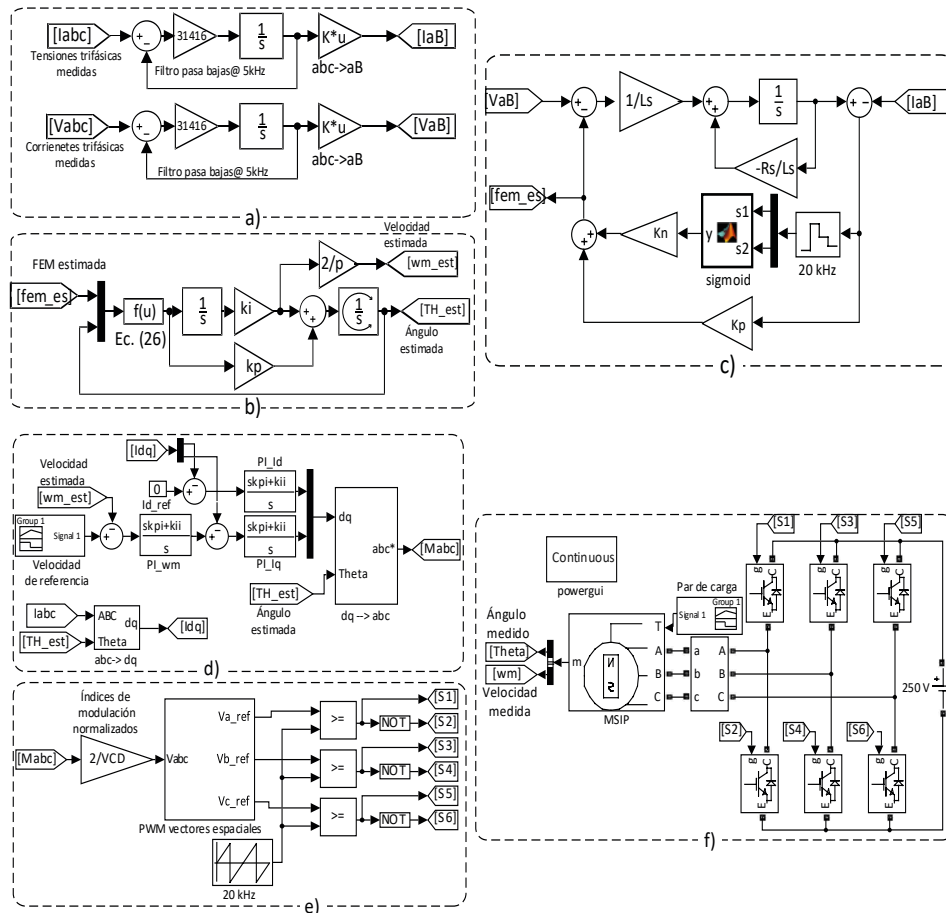


Figura 5 Modelo de simulación del sistema de control sensorless.

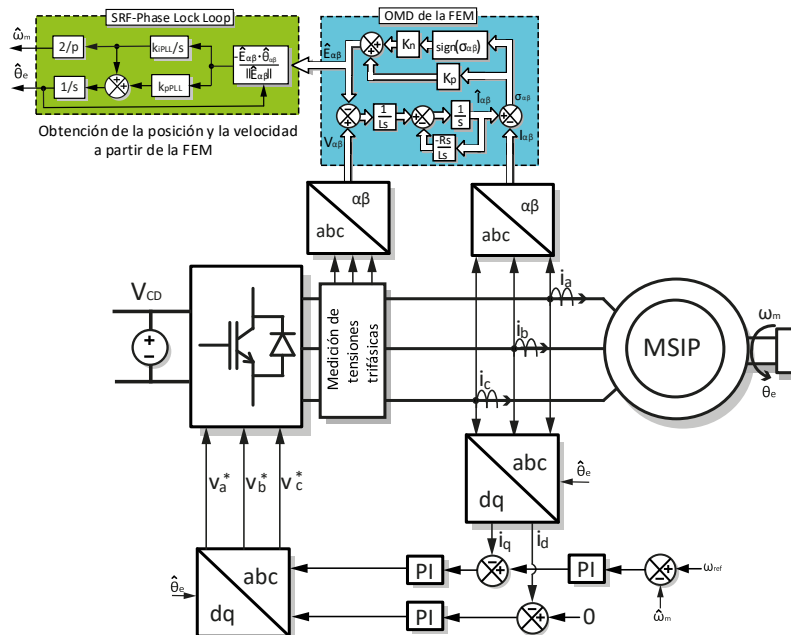


Figura 6 Diagrama del sistema de control vectorial sensorless propuesto.

Las ganancias y parámetros del sistema son mostrados en la tabla 1.

Tabla1 Parámetros del sistema usados en la simulación.

<b>MSIP</b>			
Parámetro	Valor	Unidades	Descripción
$R_s$	0.15	[ $\Omega$ ]	Resistencia del estator
$L_s$	2.5	[mH]	Inductancia del estator
$J$	$8.64 \times 10^{-3}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Inercia del rotor
$f_v$	$7.14 \times 10^{-5}$	[kg·m <sup>2</sup> ]	Fricción viscosa del rotor
$\Psi$	0.16667	[Wb]	Flujo magnético del rotor
$K_e$	85.5	[V/krpm]	Constante eléctrica
$K_T$	0.8164	[N·m/A]	Constante mecánica
$\omega_{nom}$	2	[krpm]	Velocidad nominal
$V_{CD}$	300	[V]	Tensión del Bus de CD
<b>Controlador de corriente</b>			
$\omega_c$	250	[Hz]	Ancho de banda
$MF$	60	[deg]	Margen de fase
$k_{pi}$	3.326		Ganancia proporcional
$k_{ii}$	3,288.3		Ganancia integral
<b>Controlador de velocidad</b>			
$\omega_c$	10	[Hz]	Ancho de banda
$MF$	65	[deg]	Margen de fase
$k_{p\omega}$	1.229		Ganancia proporcional
$k_{i\omega}$	44.3		Ganancia integral
<b>Observador de modos deslizantes de la FEM</b>			
$k_p$	20		Ganancia proporcional
$k_n$	200		Ganancia no lineal
$\delta$	2		Constante de la función sigmoid
<b>SRF-PLL</b>			
$\omega_c$	30	[Hz]	Ancho de banda
$MF$	60	[deg]	Margen de fase
$k_{p\omega}$	163.24		Ganancia proporcional
$k_{i\omega}$	17,765.29		Ganancia integral

### Control sensorless sin carga

Para esta prueba se usa la referencia de velocidad mostrada por la figura 7 y un par de carga igual con cero. Los resultados son mostrados por las figuras 8, 9 y 10. La figura 8a muestra la tensión medida de fase a-neutro y la figura 8b muestra los índices de modulación usando la técnica PWM *nodo común*. La figura 9a muestra la FEM real y estimada del MSIP, donde la FEM real es calculada empleando la ecuación 7. La figura 9b muestra la corriente real y estimada en marco de referencia  $\alpha\beta$ , donde se observa una diferencia entre éstas debido a la aproximación de la función  $sign(\bullet)$  por la función  $sigmoid(\bullet)$ . La figura 9c muestra el error de

estimación de la FEM, donde se observa que el error crece al incrementar la velocidad del MSIP. La figura 9d muestra el error de estimación de corriente del observador propuesto. Se observa que este error aumenta al incrementar la velocidad. A pesar de que el error de corriente es significativo, esto no afecta a las estimaciones de la FEM.

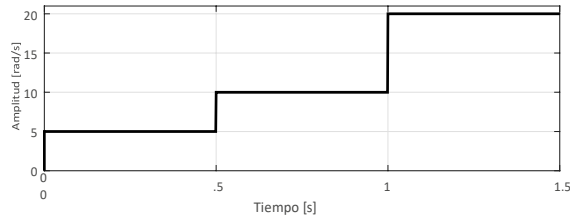


Figura 7 Referencia para los incrementos en escalones de velocidad del MSIP.

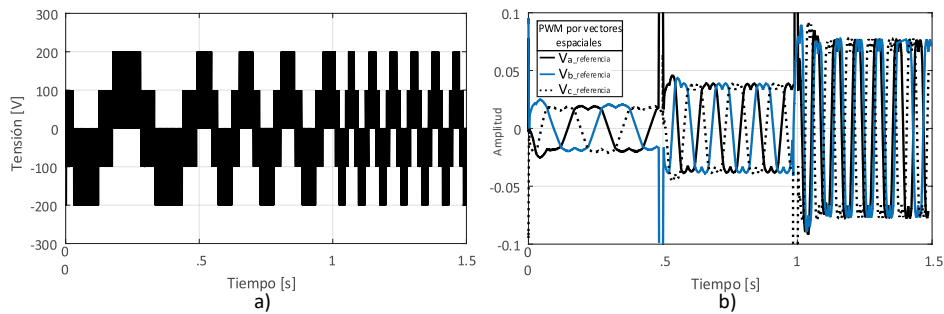


Figura 8 Tensiones del MSIP [Mohan, 2014].

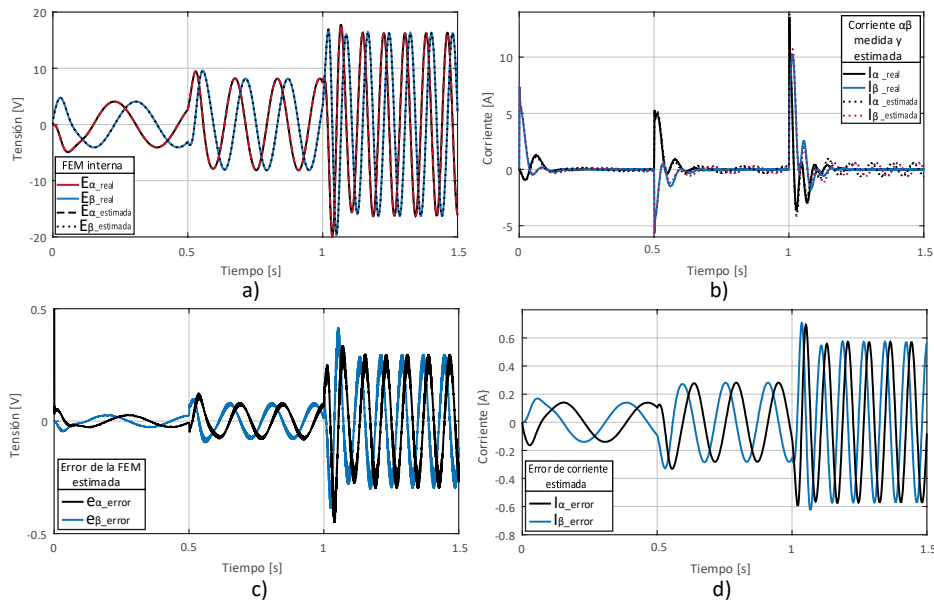


Figura 9 Resultados del observador de la FEM.

La estimación de la posición y la velocidad del rotor son obtenidas con el PLL propuesto en la Sección IV. La figura 10a muestra la posición medida y estimada del rotor. La figura 10b muestra la velocidad medida y estimada durante la simulación. Se debe observar que existe un retraso en la estimación de la velocidad, esto es debido a que se toma la estimación exclusivamente del integrador. Los errores de estimación son mostrados por las figuras 11a y 11b, donde se observa que el error incrementa al incrementar la velocidad.

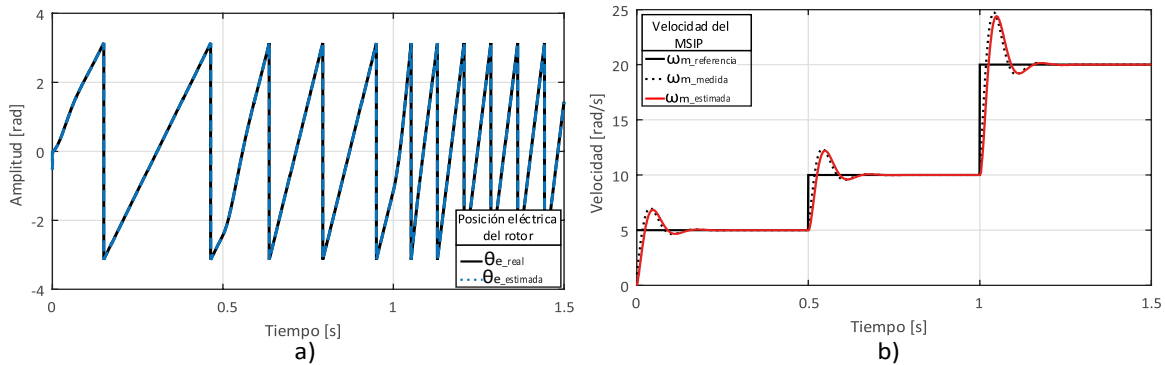


Figura 10 Estimación del PLL.

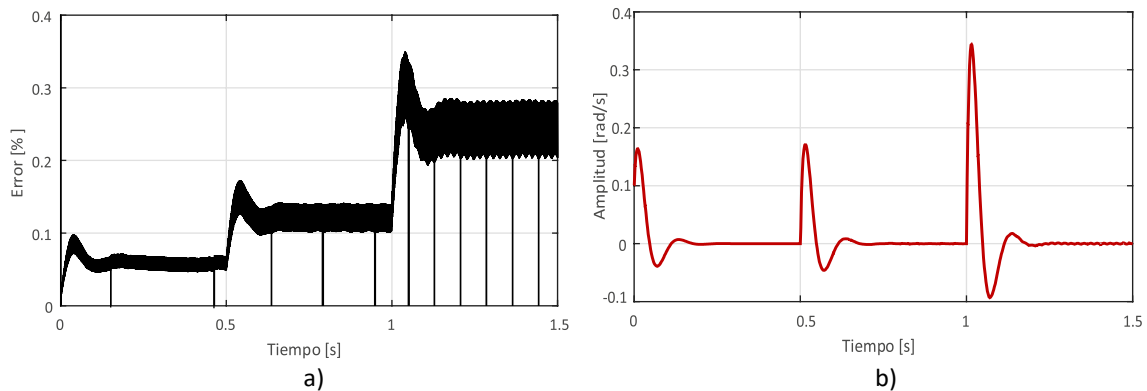


Figura 11 Error de estimación del PLL.

### Control sensorless con carga

La siguiente prueba es diseñada para evaluar el desempeño del sistema de control sensorless cuando el MSIP es sometido a cambios bruscos de carga y operando a altas velocidades. Los resultados de esta prueba, al igual que las referencias empleadas, son mostrados por la figura 12. La figura 12a muestra la velocidad de referencia y la velocidad estimada, donde se observa que el MSIP

sigue de manera correcta a la referencia. La figura 12b muestra el par de carga y el par medido. Se observa que el rizado del par incrementa al incrementar la velocidad. Finalmente, la figura 12c muestra el error en la estimación de la velocidad, donde se observa que el error tiende a cero en estado estable, aun en presencia del par de carga. Después de 12 segundos, la velocidad es llevada al 1% de su valor nominal para evaluar el desempeño del sistema de control a bajas velocidades (ver figura 12a). La velocidad no es llevada a cero debido a que la FEM desaparece bajo estas condiciones, y por lo tanto se pierde la propiedad de observabilidad del MSIP [Glumineau, 2015].

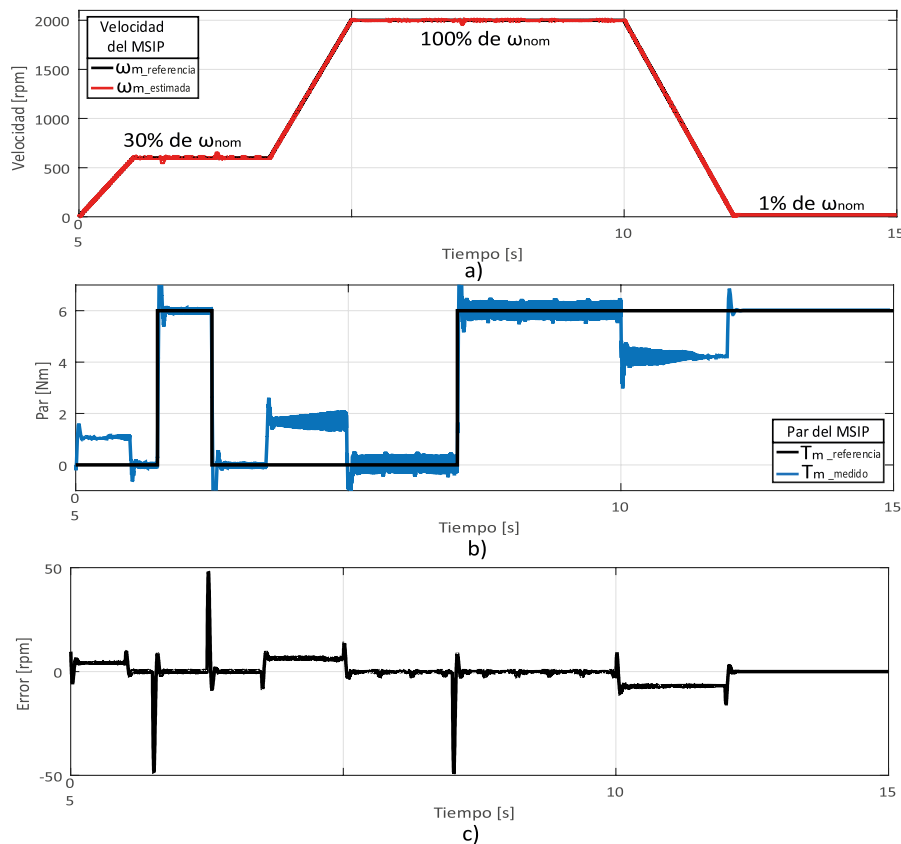


Figura 12 Resultados de la prueba de control sensorless.

Se debe resaltar que en todas las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo se usa una velocidad inicial del MSIP de 1 radian por segundo, y como consecuencia, exista una FEM que estimar. De esta manera se puede iniciar correctamente la simulación del sistema de control sensorless.

## **4. Discusión**

En este trabajo se combinaron las teorías de control clásico y modos deslizante, y como resultado se obtuvo un observador híbrido, usado para controlar a un MSIP sin necesidad de ningún sensor mecánico (sensorless). Este sistema de control sensorless propuesto probó ser una alternativa viable para ser implementado experimentalmente. Sin embargo, este algoritmo lejos de ser una solución definitiva únicamente ataca parcialmente el problema del control sensorless, ya que la principal desventaja del observador propuesto es que no trabaja a velocidad cero. Para poder trabajar en todo el rango de velocidades del motor, incluyendo velocidad cero, se deben emplear algoritmos más complejos como se explica en [Liu, 2014]. A pesar de esta desventaja, existen aplicaciones interesantes donde el sistema de control sensorless propuesto podría ser aplicado sin problema alguno, como ejemplo en un sistema de generación eólica, como se indica en [Yaramasu, 2017], debido a que una turbina eólica genera energía exclusivamente a velocidades medias y altas. Una posible mejora al algoritmo propuesto sería implementar una estrategia de modos deslizantes de segundo orden para mejorar el desempeño y atenuar el chattering [Shtessel, 2015], como se propone en [Glumineau, 2015], [Liang, 2017] y [Riviera, 2014], pero sin incluir el estimador de resistencia del estator, ya que esto es una complicación innecesaria. El siguiente paso en este trabajo es lograr la implementación física del algoritmo propuesto.

## **5. Conclusiones**

El sensor mecánico para medir la posición/velocidad es un elemento clave para la aplicación de control vectorial a motores de CA. Sin embargo, su eliminación es posible y deseable ya que este sensor implica diversas desventajas. El objetivo de este trabajo fue eliminar este sensor mediante el uso de observadores lo cual se logró de manera satisfactoria en simulación. El trabajo presentó resultados de simulación donde se demostró que es posible reemplazar el sensor mecánico por un observador de modos deslizantes y un SRF-PLL. Con esta combinación de observadores no lineales fue posible reconstruir tanto la posición y la velocidad de un motor síncrono de imanes permanentes. Finalmente, estas estimaciones



fueron usadas de manera exitosa en un sistema de control vectorial sensorless, eliminando efectivamente la necesidad del sensor mecánico.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Carranza O., et. al, Comparative study of speed estimators with highly noisy measurement signals for Wind Energy Generation Systems, *Applied Energy*, Volume 88, Issue 3, March 2011, Pages 805-813.
- [2] Glumineau A. y de Leon J., *Sensorless AC Electric Motor Control, Robust Advanced Design Techniques and Applications*, Springer International Publishing Switzerland 2015.
- [3] Holt z., Sensorless control of induction motor drives, *Proceedings of the IEEE*, Volume: 90, Issue: 8, Aug 2002, pp. 1359–1394.
- [4] Liang D. et. al, Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Second-Order Sliding-Mode Observer With Online Resistance Estimation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume: 53, Issue: 4, July-Aug. 2017, pp. 3672 – 3682.
- [5] Liu J. et. al, Implementation and performance of position sensorless PMSM control in industrial drives, *Industry Applications Society Annual Meeting, 2014 IEEE*, Vancouver, BC, Canada.
- [6] Mohan N., *Advanced Electric Drives: Analysis, Control, and Modeling Using MATLAB / Simulink*, John Wiley & Sons Inc; edición 1, septiembre de 2014.
- [7] Rivera J., et. al, Digital Sliding-Mode Sensorless Control for Surface-Mounted PMSM, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Volume: 10, Issue: 1, Feb. 2014, pp. 137–151.
- [8] Shih-Chin Y. et. al, Design issues for permanent magnet machine sensorless drive combining saliency-based and back-EMF-based control in the entire speed range, *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2016, IEEE.
- [9] Tüysüz A. et. al, Novel signal injection methods for high speed self-sensing electrical drives, *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, pp. 1273-1279.

- [10] Shtessel Y.. et al, Sliding Mode Control and Observation, 2015 IEEE, John Wiley, New Jersey., Cap 11 pp. 324-345.
- [11] Vasilios C. y Nikolaos I., Speed estimation technique for PMSM with initial rotor position uncertainty, Control Conference (ECC), 2009 IEEE, pp. 4356-4361.
- [12] Yaramasu V., et. al, PMSG-based wind energy conversion systems: survey on power converters and controls, IET Electric Power Applications, Volume: 11, Issue: 6 y 7, 2017. pp. 956-968.

# **COLLABORATIVE WEB-BASED TAGGER FOR NAMED ENTITIES IN THE TASK OF INFORMATION EXTRACTION**

## *ETIQUETADOR COLABORATIVO BASADO EN WEB PARA ENTIDADES NOMBRADAS EN LA TAREA DE EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN*

**David Efraín Muñoz Morales**

Institute of Technology Tallaght  
*David.Efrain@postgrad.ittdublin.ie*

**Fernando Pérez Téllez**

Institute of Technology Tallaght  
*Fernando.PerezTellez@it-tallaght.ie*

**David Eduardo Pinto Avendaño**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*dpinto@cs.buap.mx*

### **Abstract**

Nowadays, there exists a huge amount of information on the World Wide Web and since every day is mainly generated a lot of text data, the problem of information overload arise. In this way, the task of extracting meaningful information from text has gained the significant attention of researchers. In this paper, we propose a collaborative tagging system to help users in the task of highlighting important information in plain text files. Additionally, it allows converting tagged texts into a structured format. The web-based system is proposed in order to exploit the relevant content information provided by tagger users, since actual collaborative tagging systems suffer from issues such as tag scarcity or ambiguous labeling. Approaches such as the proposed here can facilitate to obtain better quality in tags and in any domain, allowing to achieve significant improvements in information extraction through named entities extraction, avoiding the noise of information overload.

**Keywords:** Collaborative tagging, information extraction, information overload, named entities, web-based tagger.

## **Resumen**

*Hoy en día existe una gran cantidad de información en Internet y ya que cada día se genera mucha información principalmente en forma de texto, el problema de sobrecarga de información se hace presente. En este sentido, la tarea de extraer información significativa de los textos ha ganado la atención de investigadores. En este artículo, proponemos un sistema de etiquetamiento colaborativo para ayudar a los usuarios en la tarea de resaltar información importante en archivos de texto plano. Adicionalmente, el sistema permite convertir textos etiquetados a un formato estructurado. El sistema basado en web es propuesto con el fin de explotar el contenido relevante de la información proporcionada por los usuarios etiquetadores, ya que los sistemas de etiquetamiento colaborativos actuales sufren de algunos problemas tales como la escasez de etiquetas o el etiquetado ambiguo. Enfoques como el propuesto aquí pueden facilitar la obtención de etiquetas con mejor calidad y en cualquier dominio, permitiendo lograr mejoras significativas en la extracción de información a través de la extracción de entidades nombradas, evitando el ruido en la sobrecarga de información.*

**Palabras Claves:** *Entidades nombradas, etiquetamiento colaborativo, etiquetador basado en web, extracción de la información, sobrecarga de información.*

## **1. Introduction**

Most of the existing information in the world is presented in a textual form which is unstructured information. In this way, information is significantly harder for machines to understand because of the complexity of natural language. So, with a huge amount of textual data, the information overload problem comes resulting important the extraction of meaningful data over the noise. Here is when the task of extracting information takes importance since Information Extraction (IE) is responsible for allowing to build a very general representation of meaning from unrestricted text [Bird, 2009].

IE is considered as a limited form of full natural language understanding, where the information we are looking for is known beforehand. So, IE includes two

fundamental tasks, namely, named entity recognition and relation extraction [Allahyari, 2017]. The effective identification of Named Entities (NE) represents an important aspect in Information Retrieval (IR) related tasks.

In the last years, the task of extracting meaningful data of text has gained the attention in researcher and industry fields. Collaborative tagging systems have emerged as a solution for avoiding noise on information content since every day a huge amount of information is generated, and the majority is textual data. Collaborative tagging consists in assigning labels to a set of information resources. After that, tags can be used for many purposes such as retrieval, browsing, and categorization [Bischoff, 2008].

There exists some works presenting alternatives as a solution in the problem of highlighting relevant information over the information overload, one of them are some actual works in collaborative tagging systems, however, they have some issues in quality of tags such as scarcity or ambiguous labeling. As a result, the quality of recommendations is far to be excellent.

Previously, researchers proposed several wrapper inductions approaches for the rapid generation of extractors for Web pages, where the wrapper induction programs provide users with a GUI to click and highlight strings on a rendered Web page to produce a training example. This action of clicking and highlighting is referred to as "labeling" [Chang, 2003].

On the other hand, Halpin et al claimed that there are three main entities in any tagging system: users, items, and tags. They produced a generative model of collaborative tagging in order to understand the basic dynamics behind tagging. So, they showed how tag co-occurrence networks for a sample domain of tags can be used to analyze the meaning of particular tags given their relationship to others tags [Halpin, 2012]. In this way, [Nanopoulos, 2011] proposed to model data from collaborative tagging systems with three-mode tensors, in order to capture the three-way correlations between users, tags, and items. He said that by applying multiway analysis, latent correlations are revealed, which help to improve the quality recommendations. He also developed a hybrid scheme that additionally considers content-based information that is extracted from items.

In the task of universal semantic tagging, [Abzianidze, 2017] contributes to better semantic analysis for wide-coverage multilingual text. The authors said that, besides their application in semantic parsing demonstrated in the PMB project, sem-tags can contribute to other NLP tasks, e.g. POS tagging, or research lines rooted in compositional semantics. In their work, the authors have shown that the tags provide semantically fine-grained information, and they are suitable for cross-lingual semantic parsing.

In this way, getting better tags can improve the recommender systems performance, since the philosophy behind the success of recommendation technology is the fact that it is human tendency to rely on experiences of their neighbors and friends prior to making decision of any kind, especially regarding purchase of any items, taking admissions in institutes for higher education, opting an apartment for rent or buying it, spending weekend at some holiday places, etc [Saquib, 2017]. Font et al, proposed a general scheme for building a folksonomy-based tag recommendation system to help users tagging online content resources. They achieved this by using 3 independent steps: 1) Getting candidate tags, selecting a number of candidate tags for every input tag based on a tag-tag similarity matrix derived from a folksonomy, then 2) Aggregating candidate tags, assigning scores to the candidates of step 1 and merging them all in a single list of candidates tags, and finally 3) Selecting which tags to recommend, automatically selecting the candidates that will be part of the final recommendation by determining a threshold and filtering out those candidates whose score is below the threshold [Font, 2013]. In the task of recommending items, the classification and prediction have an important role by analyzing data. It is important to know what classification algorithm to use depending on the application to be developed. As noted by Sheshasaayee & Thailambal, Classification is in supervised Learning of Machine Learning where a set of correctly predicted observation is available [Sheshasaayee, 2017].

Chavaltada et al, proposed a framework for automatic product categorization and explained that each classification method is affected in the efficiency of the model since each method have different the parameters [Chavaltada, 2017].

The rest of this paper is organized as follows. First, we show the methods used and methodology followed. After we present a use of the Web-based Tagger developed, followed by the discussions. Finally, we present the conclusions of this paper.

## **2. Methods**

Since most of the textual data exist in an unstructured form it is important to produce structured data ready for post-processing, which is crucial to many applications of text mining such as text categorization, entity extraction, learning relations between named entities, etc. That is why the proposed web-based tool aims to help users in the task of highlighting the relevant information in plain text files and then by producing a structured version of the data ready to be used as corpora in the training of some models such as NERclassifiers.

There are so many reasons to have the tool tagger based on the web because it allows access to information at any device with internet connection. Also, it facilitates a huge number of users who can tag different text files simultaneously, increasing the number of tagged texts to be used as training data.

### **Tokenization scheme**

In order to prepare the training data to be used in text mining applications, a fundamental step is tokenization of the text. Tokenization is the task of breaking up a string into identifiable linguistic units that constitute a piece of language data (words and punctuation) [Bird, 2009].

The tagged data is formatted by the web-based tool into a predefined format by the Sanford NLP Group, where data needs to be in tab-separated columns, with word tokens in one column and the class labels in another column [NLP, 2018]. An original plain text file is converted into a tab-separated columns format by tokenizing the continuous text into one column and then in a second column by assigning the class labeled for each word, if a token has not been labeled in one of the classes as a named entity, then the value in the second column for that token should be 0. A short illustration of the format is shown in figure 1, where the text has been labeled in 3 classes (Organization, Person and Location).

```
Google ORGANIZATION
was  
founded  
in  
1998  
by  
Larry PERSON
Page PERSON
and  
Sergey PERSON
Brin PERSON
while  
they  
were  
students  
at  
Stanford ORGANIZATION
University ORGANIZATION
in  
California LOCATION
.  
```

Figure 1 Stanford highlighted format (tab-separated columns).

## Learning algorithm

The need to segment and label sequences arises in many different problems in several scientific fields. In the field of computer sciences, some generative models such as Hidden Markov Models (HMMs) and stochastic models have been applied in a wide variety of problems in text and speech processing. However, these generative models are not the most optimal in the task of labeling data.

## Conditional random fields

Conditional random fields (CRFs) are a probabilistic framework for labeling and segmenting structured data, such as sequences (that is why the tokenization scheme presented in this work is important since the tokenized plain text file by the web-based tool is a continuous text). The CRF model presents some advantages over the HMMs, and the main advantage is their conditional nature, resulting in the relaxation of the independence assumptions required by HMMs in order to ensure tractable inference. CRFs avoid the label bias problem, a weakness exhibited by maximum entropy Markov models (MEMMs) [Lafferty, 2001].

The mathematics behind this model are defined as follows, considering to  $X$  as a random variable over data sequences to be labeled, and  $Y$  is a random variable over corresponding label sequences. All components  $Y_i$  of  $Y$  are assumed to range



over a finite alphabet  $\lambda$ . For example,  $X$  might range over natural language sentences and  $Y$  range over part-of-speech tagging of those sentences, with  $\lambda$  the set of possible part-of-speech tags [Lafferty, 2001].

*Definition:* Let  $G = (V, E)$  be a graph such that  $Y = (Y_v)_{v \in V}$ , so that  $Y$  is indexed by the vertices of  $G$ . Then  $(X, Y)$  is a conditional random field in case, when conditioned on  $X$ , the random variables  $Y_v$  obey the Markov property with respect to the graph:  $p(Y_v | X, Y_w, w \neq v) = p(Y_v | X, Y_w, w \sim v)$ , where  $w \sim v$  means that  $w$  and  $v$  are neighbors in  $G$ .

So, a CRF is a random field globally conditioned on the observation  $X$ .

### Proposed system

As there are three main entities in any tagging system: users, items, and tags [Halpin, 2012], the proposed work takes into consideration the affirmation. On the other hand, since the main task of tagging is to get identified concepts for users, and in any kind of domains, so, the web-based tool needs to allow access to many users and from any place they are. Also, users should download the tagged files when they need it. On the other hand, it needs to facilitate the creation of new labels, since there exist a lot of domains in which users can tag concepts. Following these statements, the system architecture is illustrated in figure 2.

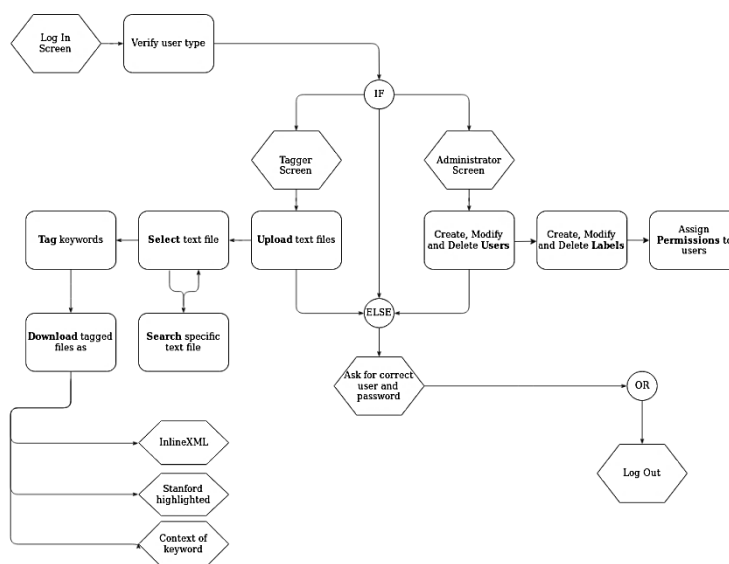


Figure 2 System architecture.

Figure 2 shows the flow of the system, where users first need to authenticate and depending on the type of user they are, is the flow they will follow.

There are two types of users: Administrator and Tagger. If the authenticated user is an administrator, then the user is able to create, modify and delete as many users and labels as necessary; and also he can assign permissions of which labels can use every user depending on the domain they will be working.

If the user is authenticated as a tagger, then the user can upload plain text files in his account, as well as search and open a specific plain text file to start tagging the keywords in that document. After that, the user is able to download the tagged plain text files in 3 different formats: InlineXML, Stanford highlighted (tab-separated columns) and a special format where the file includes the words preceding and proceeding the keywords tagged, so it can help to understand the context in which the keywords are taking place. In the next sections, we describe a more detailed explanation related to each part of the system.

### **User authentication**

As there is a huge number of people tagging text files, it is necessary to authenticate the user session to know what plain text files and classes are allowed to use for a specific user. On the other hand, it facilitates access from any device, it means, once a text file was uploaded, the user can use it at any time, in any place and any device.

### **Tagger user**

Taggers are main generators of high quality tagged data, since they have a good understanding in finding key concepts in textual data, differentiating from one and another context.

Once they are logged in the system, they are allowed to: upload, search and select specific plain text files, tag keywords or concepts in the text and then download tagged files. Alternatively, tagged files are available to download in three formats:

- InlineXML format. It is a conversion of the original text into an XML representation where the output file contains the complete original text, but

where each previously tagged concept appears between tags (similar to the HTML style) where the tag is the same that was assigned by the tagger user.

- Stanford format (tab-separated columns). The original text is converted into a structured format established by the NLP Group, where the first column contains the tokens of the plain text file and the second column contains the belonging to each token. The first thing that the web-based tool makes is tokenizing the whole text into words and punctuation. After each token is stored in the first column of the output file, in this way if the token is part of a tagged concept then the second column will store the class assigned to that concept, in another way the token will have the value of 0 as the class in the second column.
- The context of Keyword. This format is similar to the tab-separated columns format, however, only the tagged concepts are exported. In this format, the first column contains the class and the second column contains the tagged concept as well as the words that proceed and precede to that concept. It is because the meaning of the concept can be different depending on the context in which it is identified.

With this approach is possible to obtain more consistent tagged texts, avoiding some problems as tag scarcity, the use of multiple labels to refer to a single concept, and the ambiguity in the meaning of certain labels. In figure 3 is displayed the interface built for the tagger user, and it is composed of eight sections. The first section (denoted by the circle with the number 1 inside) indicates if the selected plain text file is available to be tagged by other users since every owner decides if he allows each one of his files to be tagged collaboratively. If the owner does not allow his files to be tagged collaboratively, then each of his files will only be visible in reading mode to other users, however, any user can download the generated formats of any file, because it can be used as training data. Section two contains a search field in order to help the users in finding a specific plain text file. Section three contains the classes (as buttons) allowed to each user in the task of tagging plain text files, however, if the user selects a plain text file that belongs to

other user and it is not enabled to be tagged collaboratively, then the user will not have active buttons to tag this plain text file.

Section four allows the users to upload plain text files in order to be tagged. Every tagger user can upload files as needed. Section five is one of the most important sections since it offers the possibility to download the formatted plain text files in each one of the three available formats. This section also displays the information of the current plain text file selected, such as the name, the owner and the possibility to delete the file in case that the owner is the current user. Section six have been integrated in order to provide help to each user at the time of highlighting the most important concepts in the text. When a user selects one keyword or concept in the text, he can omit part of the complete real concept so in that case, the web-tool offers an alternative to the highlighted text, such as in figure 3, where the user selected *arch* and the web-tool offers the correct alternative for this case: *architects*.

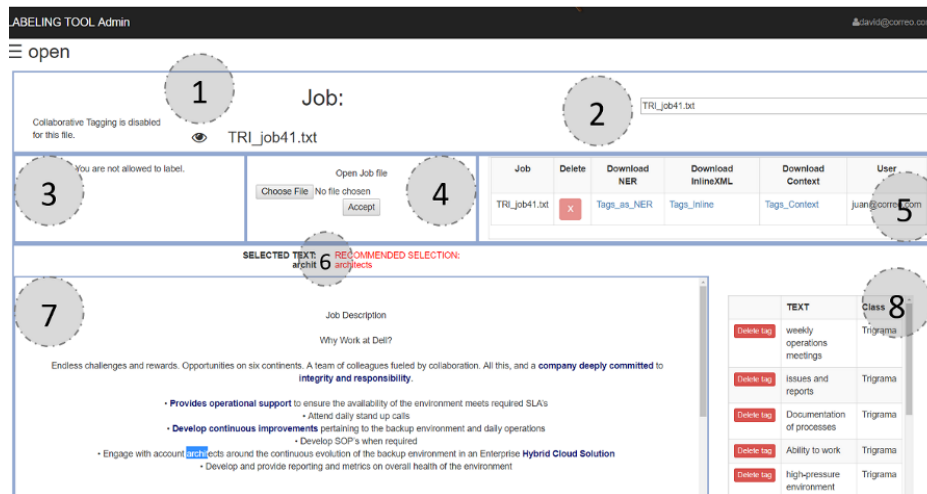


Figure 3 Tagger Interface.

Section seven is the most important of all since it displays the content of the selected plain text file to be tagged. Additionally, when the user has tagged a key concept then it is highlighted in the text with font bold and with the color assigned to the class with which the concept was tagged. This special feature helps to improve the reading of the text.

Finally, in section eight, a list with the tagged key concepts as well as the class assigned to each one are shown. Additionally, the user can delete one or more of the tagged concepts with the possibility of reassigning it to other class.

### **Administrator user**

An administrator is allowed to create, modify and delete users, as well as administrate and assign classes (kind of labels) to each tagger. The administrator has an important role because he allows users to have access only to certain classes, and he can create as many as classes are required for users, allowing to get tagged texts with high quality in tags through human feedback. Additionally, the administrator is allowed to view the plain text files and is allowed to change the user tagger password if the tagger asks for that.

In figure 4 the administration panel for classes is shown. When a new class is created it needs five features to be considered:

- Name. It denotes the name of the class and will be used to format the output files in each one of the three available.
- Short identifier. It can be a little contraction to represent the class when the original name is too long.
- Color. The color is used to highlight the tagged concepts by the tagger user in the text (displayed in section seven). It facilitates the reading to the users.
- Description. A short description needs to be provided in order to guide users to understand the meaning of the class, since sometimes some classes can be similar, e.g. skill and aptitude.
- Examples. In order to facilitate help for taggers, some examples should be included.

In figure 5 the interface corresponding to the administrator user is shown. In this screen, an administrator can assign permissions of classes to every tagger. This is because not all users will be working in the same domains, so they can request the creation and assignment of new classes to expand and improve the accuracy of the labeling for each text.

Name of Category	Tag id	Color	Description	Examples	
Aptitude	Ap	#454149	A natural ability to do something or to learn something.	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Exceptional business judgment</li> <li>* Excellent analytical and problem solving.</li> <li>* Ability to understand complex problems</li> <li>* Capacity to think strategically...</li> </ul>	Edit Category
Knowledge	Kn	#428bca	The fact or condition of knowing something with familiarity gained through experience or association: acquaintance with or understanding of a science, art, or technique	<ul style="list-style-type: none"> <li>* JavaScript</li> <li>* SQL</li> <li>* HTML 5</li> <li>* XML</li> </ul>	Edit Category
Skill	Sk	#ef5c38	The ability to use one's knowledge effectively and readily in execution or performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>* communication skills (both verbal and written)</li> <li>* Excellent timekeeping skills</li> <li>* Outstanding listening and questioning skills</li> <li>* Excellent programming</li> </ul>	Edit Category
Value	Va	#5cb85c	Values can be defined as broad	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Responsibility</li> </ul>	Edit Category

Figure 4 Screen to administrate the classes.

User edition

You can modify the permissions of the user

User name: Fernando Perez

E-mail: fernando@gmail.com

- Aptitude
- Knowledge
- Skill
- Value
- Experience
- Area
- SkSocial
- SkCommunication
- Bigrama
- Trigrama
- Cuatrigrama
- SkWork
- SkManual
- Nombre

Cancelar Guardar cambios

Figure 5 Panel to assign labeling permissions for users.

### 3. Results

This section shows the use of the system applied in an example scenario where the main task is to highlight the skills, values, and knowledge in some plain text files.

In order to tag the text, the procedure followed was (as illustrated in figure 6):

- First, the user david@correo.com logged into the system.
- Then, in section four he uploaded a plain text file called *Djob77.txt*.
- After, in section five he selected the file to be displayed.
- Once the content file was displayed in section seven, the user started to identify and highlight the relevant concepts in the text by assigning one of the

classes allowed. The user had recommendations for the selected text every time that the web-based tool identified the selection as incomplete. On the other hand, the user always had the possibility to delete some key concepts already tagged.

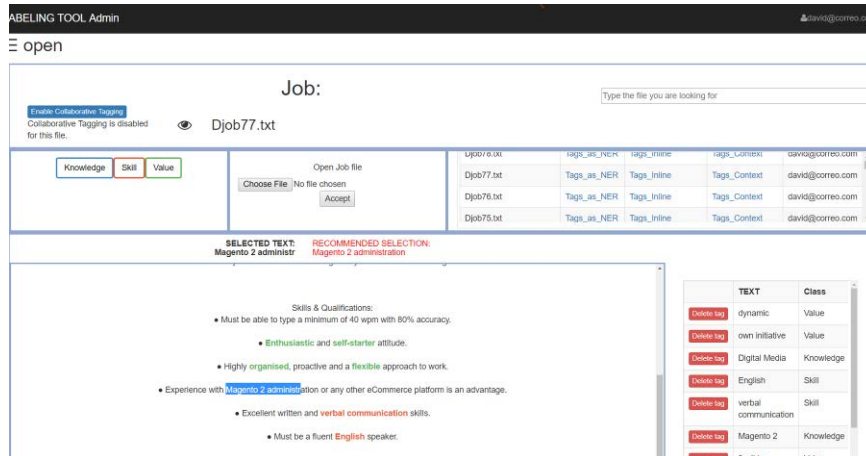


Figure 6 The web-based tagger tool in use.

Since the goal of the web-based tagger tool is to convert the unstructured information in the texts into structured data, users are interested in obtaining the keywords and their labels to which each one belongs in a structured form. That is why the next step is to get the plain text files formatted in one of the three available formats by the web-based tool.

So, after tagger users identified the most important concepts of the text related to skill, knowledge, and value they can use the generated file (structured data) for identifying named entities in new text files. Named entity recognition [NLP, 2018] have the main task of label sequences of words in a text, which are the keywords of interest. So, the web-based tagger allows us to download the named entities in the InlineXML format as well as the Stanford format as illustrated in figures 7 and 8, respectively. And the special format which includes the words preceding and proceeding the tagged keywords is illustrated, in figure 9.

As it is possible to observe obtained results demonstrate the advantage of using the web-based tagger tool in order to convert unstructured information from texts into structured information. After, this structured data can be used in some tasks

such as the training of some classifiers in the recognition of named entities, since the web-based tagger allow us to obtain the data in two formats from those offered by the Stanford named entity tagger [<http://nlp.stanford.edu:8080/ner/>, 2018].

```
1 Ez Living Furniture was founded in Galway in 1998. We are a family run Irish retailer with ten physical stores operati
2 Ez Living Furniture is looking for enthusiastic <Value>proactive</Value> candidates to join our eCommerce team on a pa
3 The successful candidate will be trained and exposed to the inner workings of a very progressive eCommerce company, in
4
5 Responsibilities:
6 • Assist in both on-page and off-page SEO activities. Procedure documents and full direction will be provided.
7 • Full training on the latest version of <Knowledge>Magento 2</Knowledge> will be provided in order to update the
8 • Scan sofa swatches and work with our digital rendering provider to ensure that the completed images are accurate
9 • Carry out various tasks as assigned by the eCommerce manager.
10
11 Skills & Qualifications:
12 • Must be able to type a minimum of 40 wpm with 80% accuracy.
13 • <Value>Enthusiastic</Value> and <Value>self-starter</Value> attitude.
14 • Highly <Value>organised</Value>, proactive and a <Value>flexible</Value> approach to work.
15 • Experience with Magento 2 administration or any other eCommerce platform is an advantage.
16 • Excellent written and <Skill>verbal communication</Skill> skills.
17 • Must be a fluent <Skill>English</Skill> speaker.
18
19 Full training will be provided for this role.
20 In your Cover Letter, please answer the following question:
21 • Have you experience with any eCommerce platforms?
22
23 Thank you for your interest in Ez Living Furniture. We look forward to receiving your application.
24
25 Related Sectors:
26 IT , Online / <Knowledge>Digital Media</Knowledge>
27 Related Locations:
```

Figure 7 InlineXML format of named entities in web-based tagger tool.

```
110 workings 0
111 of 0
112 a 0
113 very 0
114 progressive 0
115 eCommerce 0
116 company 0
117 , 0
118 including 0
119 ; 0
120 SEO Knowledge
121 , 0
122 full 0
123 spectrum 0
124 of 0
125 digital Knowledge
126 marketing Knowledge
127 , 0
128 customer Knowledge
129 service Knowledge
130 , 0
131 logistics Knowledge
132 and 0
133 website Knowledge
134 optimisation Knowledge
135 , 0
136 Responsibilities 0
```

Figure 8 Stanford format (tab-separated columns).

```
1 [Knowledge] digital marketing of [ digital marketing ]
2 [Knowledge] customer service [ customer service ]
3 [Knowledge] logistics [ logistics ] and
4 [Knowledge] website optimisation and [ website optimisation ]
5 [Knowledge] SEO off-page [ SEO ] activities
6 [Value] Enthusiastic [ Enthusiastic ] and
7 [Value] self-starter and [ self-starter ] attitude
8 [Value] organised Highly [ organised ]
9 [Value] proactive [ proactive ] and
10 [Value] flexible a [ flexible ] approach
11 [Knowledge] Magento 2 with [ Magento ] administration
12 [Skill] verbal communication and [ verbal communication ] skills
13 [Skill] English fluent [ English ] speaker
14 [Knowledge] Digital Media Online [ Digital Media ]
15 [Value] own initiative their [ own initiative ] and
16 [Value] dynamic a [ dynamic ]
```

Figure 9 Context of keyword format.



## **4. Discussion**

The problem of information overload and poor quality in tags affecting recommender systems has been examined. The Stanford named entity tagger has been studied since it represents a widely used tool by training models of labeled data. However, the low quality in tags affects to classification models in improving the recommendations. With the proposed web-based tagger is possible to improve the quality of tags in key concepts since these are labeled by people, it means, is achieved a human feedback, in this way better tags can help to improve recommender systems. On the other hand, as was mentioned in the section of tokenization scheme, the provided format (tab-separated columns) by the web-based tool tagger allows us to use the generated structured data in the training some classifier models in the task of named entities recognition.

## **5. Conclusion**

The proposed system offers some advantages in the improving quality of tags and in a fast way, as follows:

- The web-based tagger makes the information accessible since any device, allowing us to create as many labels as necessary to work in any domain. Additionally, the administrator can create as many users as necessary.
- Since tags are provided by humans, the quality of tags is high, in this way recommender systems can improve their recommendations.
- In the task of information extraction, the web-based tagger allows downloading the representation of the original text into structured data, in 3 possible formats: InlineXML, Stanford format (tab-separated columns), and a special format to knowing the context of a keyword.

Future work considers new features, such as the recognition of named entities immediately upon uploading a new plain text file for labeling. On the other hand, future work involves the use of these named entities in job descriptions and resumes, where through the use of classification algorithms and a recommender system, the companies can find the best applicant for each job offer.

## **6. Bibliography and References**

- [1] Abzianidze, L. & Bos, J. Towards Universal Semantic Tagging. International Conference on Computational Semantics, 2017.
- [2] Allahyari, M., Safaei, S., Pouriyeh, S., Trippe, E., Kochut, K., Assefi, M. & Gutierrez, J. A brief survey of text mining: classification, clustering and extraction techniques. KDD Bigdas, 2017.
- [3] Bird, S., Klein E. & Loper, E. Natural Language Processing with Python. O'Reilly, 109-112, 261-285, 2009.
- [4] Bischoff, K., Firan, C., Nejdil, W., & Paiu, R. Can all tags be used for search? in Proceedings of the 17th acm conference on information and knowledge management, 193-202, 2008.
- [5] Chang, C., Kayed, M., Girgis, M. R. & Shaalan, K. F., A Survey of Web Information Extraction Systems, vol. 18, 1411-1428, 2006.
- [6] Chang, C.-H., Hsu C.-N. & Lui S.-C., Automatic Information Extraction from Semi-Structured Web Pages by Pattern Discovery. Decision Support Systems J., vol. 35, NO. 1, pp. 129-147, 2003.
- [7] Chavaltada, C., Pasupa, K., & Hardoon, D. A comparative study of machine learning techniques for automatic product categorization. Springer international publishing, 10-17, 2017.
- [8] Font, F., Serrà, J. & Serra, X. Folksonomy-based tag recommendation for collaborative tagging systems. International Journal on Semantic Web and Information Systems, 1-27, 2013.
- [9] Halpin, H., Robu, V. & Shepherd, H. The complex dynamics of collaborative tagging. WWW 2007, 211-220, 2012.
- [10] Lafferty, J., McCallum, A. & C.N. Pereira, F., Conditional Random Fields: Probabilistic Models for Segmenting and Labeling Sequence Data, in Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Machine Learning, 282-289, 2001.
- [11] NLP. Stanford Named Entity Recognizer. The Stanford natural language processing group. May, 2018: <https://nlp.stanford.edu/software/CRF-NER.html>.

- [12] Nanopoulos, A. Item recommendation in collaborative tagging systems. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, NO. 4, 760-771, 2011.
- [13] Saquib, S., Siddiqui, J. & Ali, R. Classifications of Recommender Systems: A review. Journal of engineering and technology review, 132-153, 2017.
- [14] Sheshasaayee, A. & Thailambal, G. Comparison of Classification Algorithms in Text Mining. International journal of pure and applied mathematics, 425-433, 2017.

# **ANÁLISIS DEL VECTOR DE PARK PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS ELÉCTRICAS EN EL ESTATOR DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA**

*PARK'S VECTOR ANALYSIS FOR ELECTRICAL FAULT DETECTION IN STATOR OF LOW POWER WIND TURBINE*

***Raúl Arturo Ortiz Medina***

Universidad Politécnica de Aguascalientes  
*raul.ortiz@upa.edu.mx*

***Francisco Javier Villalobos Piña***

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*fvillalobospia@yahoo.com*

***Víctor Arturo Maldonado Ruelas***

Universidad Politécnica de Aguascalientes  
*victor.maldonado@upa.edu.mx*

***Ricardo Álvarez Salas***

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*ricardo.alvarez.salas@gmail.com*

## **Resumen**

En este trabajo se realizó la detección de falla eléctrica de estator de una máquina síncrona de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés) trifásica, funcionando como máquina eléctrica de un aerogenerador de baja potencia a diferentes velocidades. La falla eléctrica a detectar, son los circuitos abiertos provocados por cortos-circuitos entre vueltas de los devanados del estator de la PMSM. La detección de falla se realiza experimentalmente en un banco de pruebas diseñado y construido con base en una máquina de cd y un sistema electrónico de potencia que permite al motor imitar la energía mecánica del viento. Las señales trifásicas de corriente del estator de la PMSM son transformadas al marco de referencia  $\alpha\beta$  para obtener el módulo del vector de Park de las corrientes. El vector de Park se analiza con la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) para obtener la firma de falla.

**Palabras Claves:** Aerogenerador, detección de falla, vector de Park FFT.

## **Abstract**

*In this work, the detection of stator electrical failure of a three-phase synchronous permanent magnet machine (PMSM), as an electric machine of a low power wind turbine, was performed at different speeds. The electrical fault to be detected are the open circuits caused by interturns short circuits of the stator windings of the PMSM. The fault detection is made experimentally in a test bench designed and built based on a dc machine and electronic power system that allows the motor to imitate the mechanical energy of the wind. The current signals of the stator of the PMSM are transformed to the  $\alpha\beta$  reference frame, in order to obtain the modulus of the Park vector of the currents. The Park vector is analyzed with the fast Fourier transform and thus obtain the fault signature.*

**Keywords:** *Fault detection, FFT, park vector, wind turbine.*

## **1. Introducción**

La energía eólica ha sido objeto de investigación desde hace más de 100 años, pero el auge de los combustibles fósiles desincentivó el avance. Debido al calentamiento global, sólo en la última década, la capacidad instalada de energía eólica por medio de aerogeneradores a nivel mundial se ha quintuplicado, llegando a una capacidad instalada de 539,123 MW [GWEC, 2018]. Naturalmente, la investigación en muchos de los campos relacionados con la energía eólica también está creciendo, enfocándose en la naturaleza del viento, en la transformación de la energía eólica a energía eléctrica, la inserción de esta energía a la red eléctrica y su uso para sistemas aislados o distribuidos.

El aumento en el uso de generadores implica avances en pro de hacer más eficiente el uso de la energía eólica. Así mismo, el desarrollo de aerogeneradores implica cubrir necesidades derivadas del su uso como el mantenimiento de los aerogeneradores, ya que son máquinas en constante movimiento y calentamiento mecánico y eléctrico, lo que las hace propensas a fallas.

El trabajo en mantenimiento de aerogeneradores basado en el avance científico-tecnológico lo abordan trabajos como [Ribrant, 2007], [Lu, 2009], [Daneshi-Far, 2010] y [Amirat, 2014] que abundan en estadísticas de fallas, tipos de fallas,

frecuencia de ocurrencia de las fallas y componentes en los que ocurren las fallas. Los mismos autores reportan sistemas de monitoreo, detección y diagnóstico de fallas, que usan sensores de vibración externos en algunos componentes, cuyas señales se tratan con diferentes técnicas de análisis de señales, mientras que otros sistemas usan las propias señales de corriente del aerogenerador sin elementos invasivos, ni la interrupción de la señal y a partir de ahí se utilizan técnicas de análisis de señales para determinar los criterios de mantenimiento según aparezcan las fallas.

El uso de los aerogeneradores se ha concentrado en las granjas eólicas de gran capacidad y la mayoría de los trabajos publicados con respecto a fallas son en aerogeneradores de gran capacidad [Hyers, 2006,] [Miguelañez, 2010], [Ko, 2012]. Aun así, existe en la literatura, muy poca información estadística de fallas en aerogeneradores grandes y existen aún menos para aerogeneradores de baja potencia. Los aerogeneradores de este tipo, conocidos como pequeños aerogeneradores y micro aerogeneradores, se encuentran tanto en zonas urbanas como en lugares aislados y pueden ser o no interconectados a la red, además de que el recurso eólico que necesitan es mínimo comparado con el de aerogeneradores de gran capacidad. Existe gran cantidad de literatura acerca de pequeños y micro aerogeneradores [Tummala, 2016], [Grieser, 2015], [Lubitz, 2014]. Pero existen muy pocos en materia de fallas en este tipo de aerogeneradores como [Cai, 2016] que aborda fallas mecánicas o [Hosseinzadeh, 2016] que abordan las fallas de manera general en micro redes eléctricas.

Este trabajo tiene su aportación en el análisis de fallas eléctricas de estator en máquinas de baja potencia de aerogenerador a diferentes velocidades, a través del análisis de la FFT del vector de Park como herramienta para detectar fallas por medio de las corrientes de estator de la máquina eléctrica.

## **2. Métodos**

### **Vector de Park**

Las señales trifásicas de corriente del estator de la máquina eléctrica del aerogenerador, se extraen a través del sistema de adquisición de corriente y del

programa de computadora diseñado, para cada experimento que se realice. Las señales adquiridas se analizan haciendo uso del vector de Park, que engloba la información de la señal trifásica en ese solo vector, dando la facilidad de evidenciar el desbalance que pudiera existir en la señal trifásica [Milanez, 2003].

El vector de Park, en este caso de corrientes, también llamado fasor de espacio instantáneo, es una herramienta utilizada en la teoría de máquinas eléctricas, que toma como base las corrientes de magnetización que se muestran en ecuaciones 1 que son, en principio, las corrientes de un sistema trifásico balanceado en estado estable.

$$\begin{aligned}i_a &= \hat{I} \cos(\omega t + \phi) \\i_b &= \hat{I} \cos(\omega t + \phi - 120) \\i_c &= \hat{I} \cos(\omega t + \phi + 120)\end{aligned}\tag{1}$$

Donde:

- $i_a$  Corriente de estator de la fase a.
- $i_b$  Corriente de estator de la fase c.
- $i_c$  Corriente de estator de la fase d.
- $\hat{I}$  Magnitud de la corriente.
- $\omega$  Velocidad angular eléctrica ( $\omega = 2\pi f$ ).
- $f$  Frecuencia eléctrica.
- $\phi$  Ángulo de fase de la señal senoidal.

El sistema trifásico, independientemente de la perturbación, cumple con el teorema de Fortescue, que dice que una señal trifásica puede componerse a partir de las componentes de secuencia positiva, negativa y cero [Grainger, 1996], estas componentes son representadas a través de los superíndices  $+$  para positivo,  $-$  para negativo y  $0$  para secuencia cero como es el caso en en el sistema de ecuaciones 2.

$$\begin{aligned}i_a &= i_a^+ + i_a^- + i_a^0 \\i_b &= i_b^+ + i_b^- + i_b^0 \\i_c &= i_c^+ + i_c^- + i_c^0\end{aligned}\tag{2}$$

El vector de Park de corrientes se define como se muestra en la ecuación 3.

$$\tilde{I} = \tilde{I}^+ + \tilde{I}^- + \tilde{I}^0 \quad (3)$$

Donde las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero, son definidas en el sistema de ecuaciones 4.

$$\begin{aligned} \tilde{I}^+ &= (2/3)(i_a^+ + ai_b^+ + a^2i_c^+) = \hat{I}^+ e^{j(\omega t + \phi^+)} \\ \tilde{I}^- &= (2/3)(i_a^- + ai_b^- + a^2i_c^-) = \hat{I}^- e^{j(\omega t + \phi^-)} \\ \tilde{I}^0 &= (2/3)(i_a^0 + ai_b^0 + a^2i_c^0) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Una característica importante del vector de Park es que puede expresarse sólo en términos de su secuencia positiva y negativa por separado, y al hacer el cuadrado de la magnitud del vector de Park de corrientes se obtiene la ecuación 5.

$$|\tilde{I}|^2 = |\tilde{I}^+ + \tilde{I}^-|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 + 2(\hat{I}^+ \hat{I}^-) \cos(2\omega t + \phi^+ + \phi^-) \quad (5)$$

Se encuentra entonces que el valor promedio del cuadrado del vector de Park está mostrado en la ecuación 6.

$$|\tilde{I}|^2 = (\hat{I}^+)^2 + (\hat{I}^-)^2 \quad (6)$$

De las expresiones 5 y 6 se infiere que  $|\tilde{I}|^2$  tiene valores definidos en las ecuaciones 7 y 8 que oscilan entre un máximo de

$$|\tilde{I}|_M^2 = (\hat{I}^+ + \hat{I}^-)^2 \quad (7)$$

Y un mínimo de (ecuación 8).

$$|\tilde{I}|_m^2 = (\hat{I}^+ - \hat{I}^-)^2 \quad (8)$$

Resolviendo 7 y 8 para las secuencias positiva y negativa, quedan las ecuaciones 9 y 10 respectivamente.



$$\hat{I}^+ = (|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m) / 2 \quad (9)$$

$$\hat{I}^- = (|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m) / 2 \quad (10)$$

De esta manera, las componentes de secuencia positiva y negativa se obtienen a partir de los valores extremos del vector de Park, por lo que el monitoreo de estas señales permite la estimación de desbalance, como se observa en la ecuación 11.

$$\%IU = 100 \hat{I}^+ / \hat{I}^- = 100 (|\tilde{I}|_M - |\tilde{I}|_m) / (|\tilde{I}|_M + |\tilde{I}|_m) \quad (11)$$

Para que el efecto que tiene un desbalance en la señal de corriente de una máquina eléctrica, por facilidad matemática, las corrientes se trasladan al marco de referencia  $\alpha - \beta$  por medio de la transformación de Concordia, mostrada en la ecuación 12 [Abad, 2011].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(-2\pi/3) & \cos(2\pi/3) \\ 0 & -\text{sen}(-2\pi/3) & -\text{sen}(-2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde:

$i_\alpha$  Componente de corriente  $\alpha$ .

$i_\beta$  Componente de corriente  $\beta$ .

$i_0$  Componente de corriente 0.

De esta manera, el módulo del vector de Park de corrientes de una señal trifásica queda como se indica en la ecuación 13.

$$ISP = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \quad (13)$$

La obtención del módulo del vector de Park es una manera de detectar un desbalance y, por ende, una falla, ya que cada condición que presenta una máquina eléctrica en sus señales trifásicas se producen también diferentes formas de onda del módulo vector de Park, a esto se le denomina firma de falla para el sistema en

cuestión. El módulo de vector de Park puede analizarse por diferentes métodos de procesamiento de señales, que han sido comprobados para la detección de fallas para motores de inducción de uso industrial o motores brushless con aplicaciones industriales o de vehículos eléctricos. [Bembouzid, 2003], [Maldonado, 2016], [Gritli, 2017], [Craciunescu, 2012]

### **Transformada rápida de Fourier**

La FFT es un algoritmo para implementar la transformada discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés). La DFT es la forma discreta de la transformada de Fourier (FT, por sus siglas en inglés), esta última es una herramienta de análisis espectral que permite conocer las diferentes frecuencias que componen una señal que está representada en el dominio temporal. La diferencia entre la FT y la DFT es la función de entrada que se asigna, en el caso de la FT se necesita una señal periódica en tiempo continuo puede tener un número infinito de componentes de frecuencia, donde la separación en frecuencia de 2 componentes armónicas sucesivas es  $1/T_p$  en donde  $T_p$  es el período de la componente fundamental. Por el contrario, el rango de frecuencias de señales en tiempo discreto es limitado al intervalo  $(-\pi, \pi)$  o  $(0, 2\pi)$ . Una señal discreta de período fundamental N puede tener componentes de frecuencias separadas  $2\pi/N$  radianes a una frecuencia  $f=1/N$  ciclos.

La adquisición de señales que se hace en este trabajo tiene una cantidad limitada de datos representando la señal adquirida a través de un procesador de señales digitales (DSP por sus siglas en inglés), es por eso que se usa la DFT a través del algoritmo FFT [Weeks, 2007].

### **Banco de pruebas**

Las pruebas experimentales se llevan a cabo en un banco de pruebas diseñado y construido con el objetivo de detectar pruebas en máquinas eléctricas de aerogenerador mostrado en la figura 1. El banco de pruebas consta de un sistema de electrónica de potencia basado en puentes de topología H con dos ramas de IGBTs, capaz de tener de comunicación bidireccional entre el equipo de cómputo y

la unidad central de procesamiento basada en el DSP a través de una computadora personal. El sistema electrónico de potencia cuenta con un control PI discreto, insertado en el mismo DSP, para efectuar el control y lograr el seguimiento de velocidad de un motor de cd que se conecta al sistema como parte del banco de pruebas. La retroalimentación se da por medio de un tacogenerador acoplado al motor de cd.

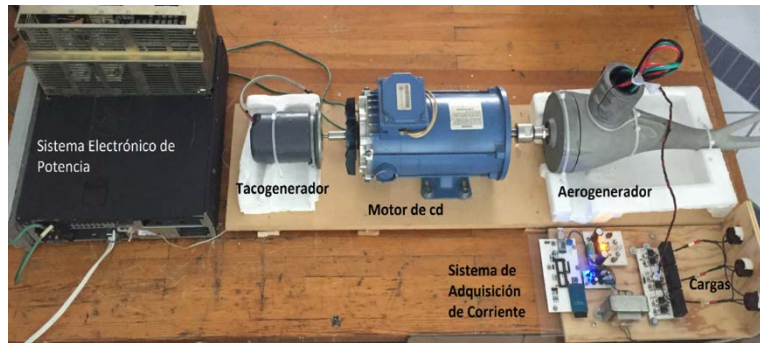


Figura 1 Banco de pruebas para detección de falla eléctrica de estator de aerogenerador.

El motor de cd está acoplado mecánicamente con el aerogenerador en análisis. En el banco de pruebas, la máquina de cd se encarga de proveer la energía mecánica al aerogenerador la cual normalmente proviene del viento. La salida de la máquina eléctrica del aerogenerador se conecta a una carga resistiva trifásica balanceada, para el caso de esta prueba la carga trifásica es de 330 W. Las señales de corriente que van del estator de la máquina a la carga son adquiridas con un sistema basado en sensores de efecto hall, diseñado y construido con un DSP y un módulo de memoria SD con la capacidad de recolección de una gran cantidad de datos.

### **Introducción de falla eléctrica**

El aerogenerador que se utiliza para la experimentación de la detección de fallas eléctricas de estator, es un aerogenerador modelo air 30, para aplicaciones de generación distribuida con datos nominales de potencia de 400 W, 33.33 A y una velocidad nominal de 1800 rpm.

La máquina eléctrica del aerogenerador es de tipo síncrona de imanes permanentes, trifásica, de 6 polos y alimenta su carga a través de un convertidor

ca-cd. Para realizar la detección de falla a través del vector de Park y la FFT, se intervino la máquina para que tener acceso a las corrientes trifásicas del estator y al sensado de las mismas. La intención de implementar una falla, se trata de establecer anomalías controladas consistentes con fallas eléctricas en estator de la máquina. Con este fin, se provoca un desbalance en una de las fases conectando una resistencia externa en serie con la línea que va del estator del generador a la carga. El desbalance introducido es consistente con una falla de circuito abierto, que puede ser producido por un corto circuito no atendido en el mantenimiento de la máquina. La modificación a la máquina es reversible, lo que permite regresar a la máquina a su estado sano cuando las pruebas con falla finalizan. El diagrama eléctrico que ilustra la introducción del desbalance se encuentra en la figura 2, muestra las fases a y b del estator de la máquina en estado normal y en la fase c se observa  $R_x$ , la cual para esta serie de pruebas tiene un valor de  $0.5 \Omega$  y se coloca para introducir el desbalance.

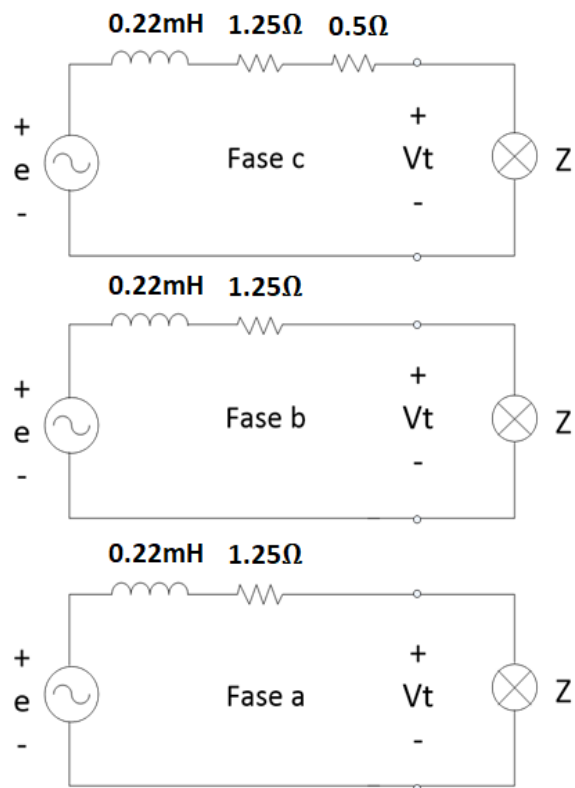


Figura 2 diagrama eléctrico que ilustra la introducción del desbalance.

### 3. Resultados

El banco de pruebas para la detección de falla eléctrica de estator de aerogenerador entrega los datos de las corrientes trifásicas antes de someter a la máquina al desbalance controlado y después de ser sometida al desbalance, estas corrientes se muestran en la figura 3 y 4 respectivamente. La diferencia entre las fases c, mostradas en amarillo, de ambas señales trifásicas es evidente, debido a que el desbalance se asocia a una falla crítica como lo es el circuito abierto. Ambas señales trifásicas fueron tomadas de la prueba a 600rpm como ejemplo para ilustrar como se ven las señales de corriente, las gráficas de las pruebas de 900, 1200 y 1600 rpm se omiten por la similitud que hay entre ellas

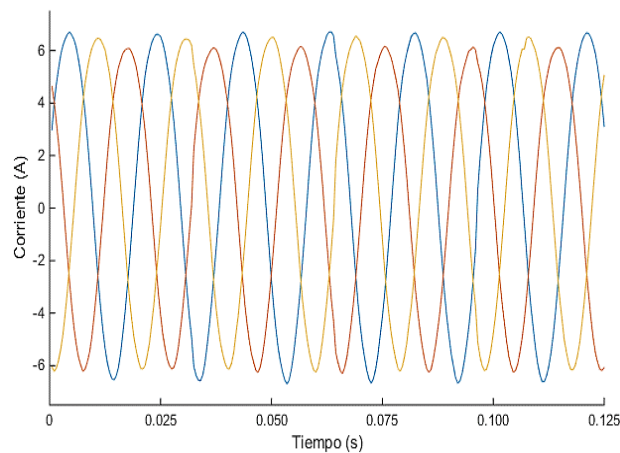


Figura 3 Corrientes trifásicas del devanado del estator sin falla de la máquina de imanes permanentes para aerogenerador.

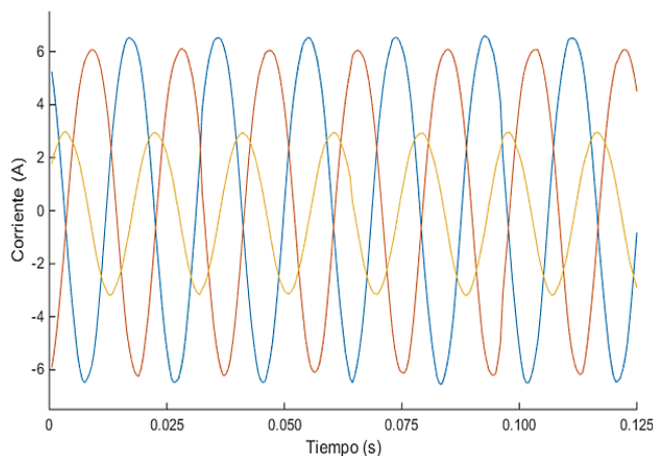


Figura 4 Corrientes trifásicas del devanado del estator con falla de la máquina de imanes permanentes para aerogenerador.

Las señales obtenidas a través de la experimentación se someten a procesamiento a través de la FFT, esta herramienta permite observar los componentes de frecuencia que hay en cada señal, tanto para el caso sin falla como para el caso con falla o desbalance, de esta manera se puede observar si existe o no, un cambio en las componentes de frecuencia de la señal sana con respecto a la señal con falla y si existe diferencia, se puede ver en qué frecuencia se produce el cambio.

### FFT para una velocidad de 600 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 51.28 Hz. La figura 5 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 102.56 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

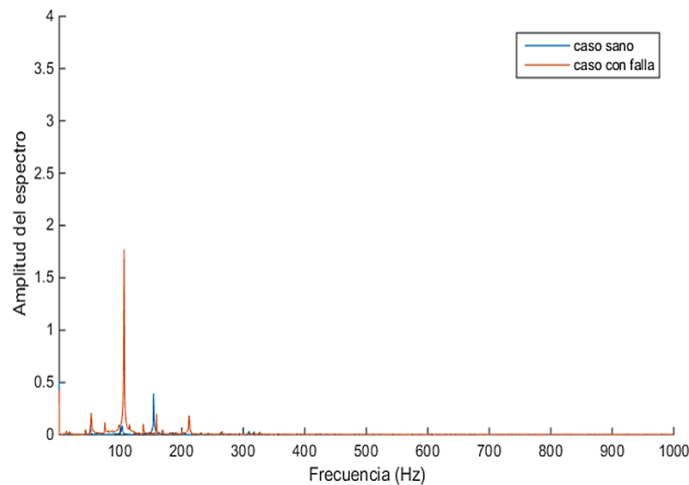


Figura 5 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 600 rpm.

### FFT para una velocidad de 900 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 80.01 Hz. La figura 6 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 160.02 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

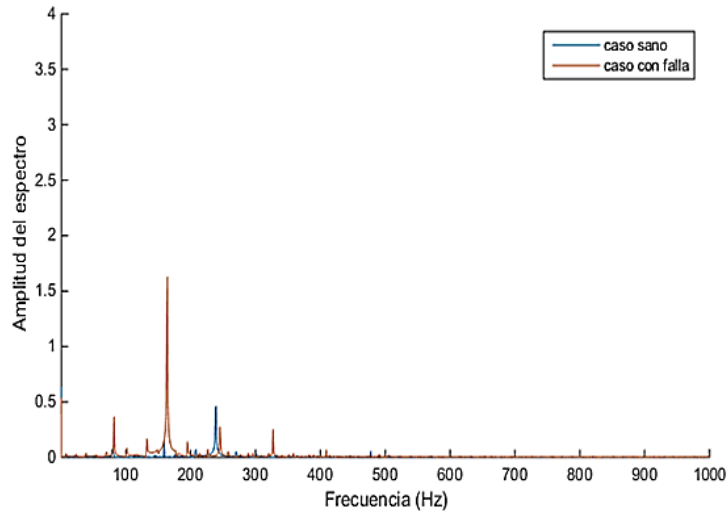


Figura 6 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 900 rpm.

### FFT para una velocidad de 1200 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 111.11 Hz. La figura 7 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 222.22 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

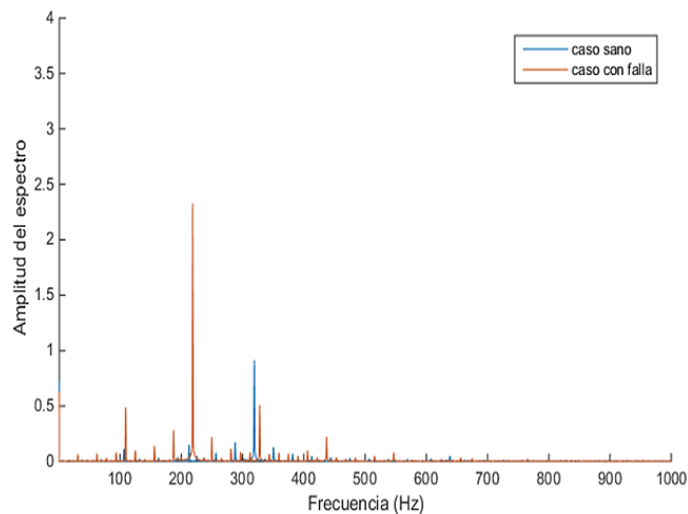


Figura 7 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 1200 rpm.

## FFT para una velocidad de 1600 rpm

A esta velocidad, la frecuencia eléctrica fundamental de operación de las corrientes del estator es de 142.85 Hz. La figura 8 muestra las componentes de frecuencia que aparecen en el vector de Park de corrientes para el caso sin falla y el caso con falla, en este último se observa la aparición de una componente de frecuencia de 285.7 Hz que corresponde al doble de la frecuencia de operación normal.

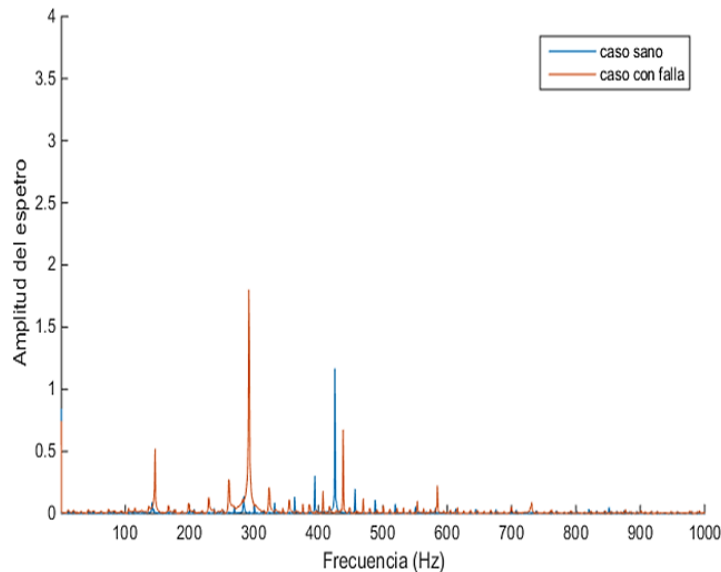


Figura 8 Análisis comparativo de la FFT, casos sin falla y con falla a 1600 rpm.

## 4. Discusión

El análisis espectral de las señales de corriente obtenidas del banco de pruebas en los casos sin falla y con falla, se analizan a través de la FFT. De los experimentos realizados se obtiene que el análisis del espectro de firma de falla para el caso de falla eléctrica del estator de la máquina eléctrica, resulta en que los espectros se encuentran en múltiplos del doble de la frecuencia de operación de la máquina eléctrica, este patrón es coincidente con los resultados mencionados en [Bembouزيد, 2003], [Maldonado, 2016], [Gritli, 2017], [Craciunescu, 2012], la expresión correspondiente de este resultado se muestra en la ecuación 14.

$$f_f = 2nf_s \quad (14)$$



Donde  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ ,  $f_f$  es la frecuencia donde aparece la mayor magnitud de espectro y  $f_s$  es la frecuencia de operación del PMSG del aerogenerador. La magnitud del espectro de falla decrece mientras  $n$  aumenta. En la práctica se toma solamente  $n = 1$ , ya que es la frecuencia en donde el espectro tiene mayor magnitud, por lo que la ecuación 14 queda como se muestra en la ecuación 15.

$$f_f = 2f_s \quad (15)$$

El resultado de las pruebas para la detección de falla controlada de la PMSM del aerogenerador de 400 W para los cuatro casos de velocidad analizados por con la FFT del vector de Park son satisfactorios y evidentes de acuerdo al a severidad de la falla presentada según el desbalance introducido.

## 5. Conclusiones

El banco de pruebas diseñado y construido resultó ser una herramienta muy de gran utilidad en este trabajo y podrá ser utilizado con otras máquinas y para otros análisis en futuras investigaciones.

El vector de Park ampliamente probado para máquinas de inducción, mostró también ser útil para la detección de desbalances en corrientes del estator en máquinas síncronas de imanes permanentes utilizadas para aerogeneración, de acuerdo a los resultados de la FFT que mostró la aparición del espectro de frecuencias al doble de la frecuencia de operación.

La detección de la falla de circuito abierto abre la posibilidad de explorar la posibilidad de diagnóstico de fallas de cortos circuitos internos de naturaleza incipiente en devanados de estator a través de las técnicas mostradas.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amirat Y., Benbouzid M. E. H., Al-Ahmar E., Bensaker B., Turri S., (2009) A Brief Status on Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Energy Conversion Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 13, Páginas 2629-2636.

- [2] Abad G., López J., Rodríguez M. A., Marroyo L., Iwanski G. (2011), Doubly Fed Induction Machine, Modelling and Control for Wind Energy Generation, IEEE Press Series on Power Engineering.
- [3] Benbouzid M. E. H. and Kliman G. B. (2003), What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pp. 238-244.
- [4] Cai H., Sun Q., Wood D., (2016) Condition monitoring and fault diagnosis of small permanent magnet generator, Wind engineering, Vol 40(3) 270-282.
- [5] Craciunescu A., Ciumbulea G., Media M., (2012) Phase-modulus diagram of instantaneous current's space phasor as diagnosis tool of induction motor's stator windings, International conference of renewable energies and power quality, Santiago de Compostela, España.
- [6] Daneshi-Far Z., Capolino G. A. and Henao H., (2010) Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators, Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference on, Rome, 2010, pp. 1-6.
- [7] Global Wind Energy Council GWEC, Global Report: Annual Market Brussels, <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>, revisado en Junio de 2018.
- [8] Grainger J. J. and. Stevenson Jr W. D., Análisis de sistemas eléctricos de potencia, McGraw Hill, USA, 1996.
- [9] Grieser B., Sunak Y. and Madlener R., (2015), Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany, Renewable Energy, 78, issue C, p. 334-350.
- [10] Hosseinzadeh M. and Salmasi F. R., (2016) Fault-Tolerant Supervisory Controller for a Hybrid AC/DC Micro-Grid, in IEEE Transactions on Smart Grid.
- [11] Hyers R. W., MCGowan J. G., Sullivan K. L., Manwell J. F. & Syrett B. C., (2006), Condition monitoring and prognosis of utility scale wind turbines, Energy Materials, 1:3, 187-203.
- [12] Ko Y. J., Lee K. B., Lee D. C., Kim J. M., (2012) Fault diagnosis of three parallel voltage source converter for a high-power wind turbine, IET Power Electron., Vol. 5, Iss. 7, pp. 1058–1067.

- [13] Gritli Y., Bellini A., Rossi C., Casadei D., Filippetti F. and Capolino G. A., (2017) Condition monitoring of mechanical faults in induction machines from electrical signatures: Review of different techniques, 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, pp. 77-84.
- [14] Lu B., Li Y., Wu X. and Yang Z., (2009) A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, Power Electronics and Machines in Wind Applications, PEMWA 2009. IEEE, Lincoln, NE, 2009, pp. 1-7.
- [15] Lubitz W. D., (2014) Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine, *Renewable Energy*, Volume 61, Pages 69-73.
- [16] Maldonado-Ruelas V. A., Villalobos-Piña F. J., Sosa-Serna G. A., Alvarez-Salas R., Pazos-Flores F. and Alvarez-Salas J. A., (2016) In-wheel brushless DC motor test-bed for control and fault detection, IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp. 1-5.
- [17] Migueláñez E. and Lane D., (2010) Predictive diagnosis for offshore wind turbines using holistic condition monitoring, OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, pp. 1-7.
- [18] Milanez D. L. and Emanuel A. E. (2003), The instantaneous-space-phasor: a powerful diagnosis tool, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 52, no. 1, pp. 143-148.
- [19] Ribrant J. and Bertling L., (2007) Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005 Power Engineering Society General Meeting. IEEE, Tampa, FL, 2007, pp. 1-8.
- [20] Tummala A., Kishore R., Dipankur V., Sinha K., Indraja V., Krishna V. H., (2016) A review on small scale wind turbines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, Pages 1351-1371.
- [21] Weeks M., (2007) Digital signal processing using MATLAB and wavelets, *Electrical Engineering Series*, Infinity Science Press LLC.

# **DESARROLLO DE UN BANCO DE SUPERCAPACITORES CON RED DE BALANCEO Y COMUNICACIÓN CAN**

## *DEVELOPMENT OF A SUPERCAPACITORS BANK WITH BALANCING NETWORK AND CAN BUS COMMUNICATION*

### ***Edgar Peralta Sánchez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*edgarps@ieee.org*

### ***Manuel Tlapa Juárez***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*mtlapa202@hotmail.com*

### ***Gerardo Mino Aguilar***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*gmino44@ieee.org*

### ***Beatriz Eugenia Graniel García***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*bgraniel@yahoo.com*

### ***Félix Quirino Morales***

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*fquirino@live.com.mx*

## **Resumen**

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en supercapacitores que pueden ser aplicados en redes inteligentes, vehículos eléctricos y ferrocarriles, entre otros, requieren ser diseñados de manera robusta y confiable, por esta razón en el presente artículo se presenta el diseño e implementación de un banco de supercapacitores (BSCs) conformado por 18 celdas, se diseña su circuito de balanceo de voltajes, implementando tres topologías de balanceo para evaluar el tiempo de balanceo de voltajes en cada supercapacitor. Se implementa un sistema de monitoreo de voltajes y temperatura a través de una red CAN conformada por 3 nodos esclavos y un nodo maestro que recibe la información de dichas variables a una interfaz gráfica utilizando una pantalla LCD. Las pruebas experimentales de la red CAN implementada muestran el correcto envío de información de las variables

medidas y las distintas topologías de balanceo implementadas muestran las ventajas y desventajas que conllevan a la selección más adecuada a implementar en el BSCs.

**Palabras Claves:** Balanceo de voltajes, CAN bus, supercapacitor.

## **Abstract**

*Energy storage systems based in supercapacitors that can be applied in smart grids, electric vehicles and railways, among others, require to be design in a reliable and robust way, for this reason this paper presents the design and implementation of a supercapacitor bank (SB) conformed by 18 cells, its voltage balancing circuit was designed, implementing three balancing topologies to evaluate the voltage balancing time in each supercapacitor. A voltage and temperature monitoring system is implemented through a CAN network consisting of 3 slave nodes and a master node that receives the information and send to a graphic interface using a LCD screen. The experimental tests of the CAN network implemented shows the correct sending of the information of the variables measures, on the other hand, the voltage balancing circuits implemented shows the advantages and disadvantages that lead to the most appropriate selection to implement in the SB.*

**Keywords:** CAN bus, supercapacitor, voltage balancing.

## **1. Introducción**

Los supercapacitores (SCs) también conocidos como condensadores electroquímicos de doble capa (EDLC) son capacitores que presentan una alta densidad de energía en comparación a los capacitores convencionales. Los supercapacitores pueden presentar capacitancias de hasta 3000 F, esto refleja un incremento de 6 órdenes de magnitud en comparación a los capacitores convencionales que presentan capacitancias en el orden de  $\mu\text{F}$ . El inconveniente que presentan estos dispositivos es su voltaje nominal muy bajo entre 2.3 y 2.7 V [Dixon, 2002].

En un supercapacitor (SC), los electrodos son sustratos conductores comúnmente hechos de carbono poroso lo cual permite aumentar la superficie específica hasta

$2000 \text{ m}^2/\text{g}$ , cada uno con un colector de corriente asociado, mientras el separador es una matriz porosa no conductora. Los huecos, tanto en los electrodos como en el separador, están rellenos con una solución electrolítica (figura 1). Según el electrolito utilizado, pueden alcanzarse entre 1 y 2.7 V de voltaje de salida [Yanqing, 2007].

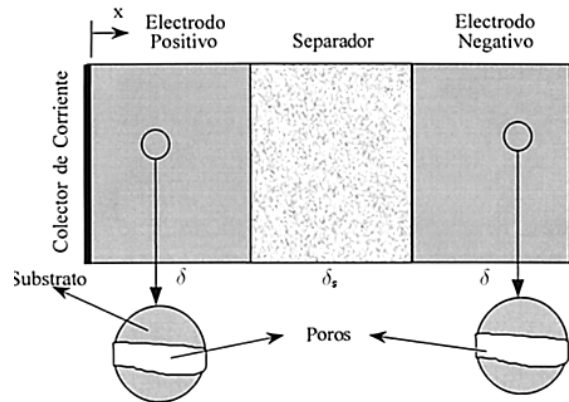


Figura 1 Celda de un supercapacitor.

El modelo del circuito equivalente para un supercapacitor se muestra en la figura 2. Este modelo está compuesto por una resistencia equivalente en serie y una resistencia equivalente en paralelo como se muestra en la figura 2.

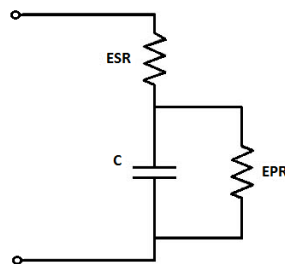


Figura 2 Circuito equivalente de un supercapacitor.

La resistencia equivalente en serie (ESR) representa las pérdidas por conducción, esta resistencia es muy pequeña en un rango de 1-10 m $\Omega$ . En cuanto a la resistencia equivalente en paralelo (EPR), representa las pérdidas por corriente de fuga, y estas corrientes son usualmente muy pequeñas, en un rango de 1-10 mA. En aplicaciones de alta frecuencia las impedancias mencionadas son consideradas, sin embargo,

en alta aplicaciones de potencia la EPR es mucho mayor que la ESR por lo que la EPR se puede despreciar [Nikkhoo, 2016].

Al presentar la limitación de bajo voltaje, se requiere de una conexión en serie de diversas celdas para alcanzar mayores voltajes y de esta manera ser aplicadas en algún sistema en específico. Es importante considerar que el voltaje en una conexión serie/paralelo de estos dispositivos no es igualmente distribuido, lo cual, puede llevar a un voltaje asimétrico entre estos, por lo tanto, es necesario implementar un circuito que equilibre los voltajes de estas celdas.

Existen dos formas para realizar el balanceo de voltajes en una conexión de más de dos SCs conectados en serie; pasiva y activa. Los métodos de balanceo de voltaje pasivo eliminan el exceso de voltaje de los elementos totalmente cargados a través de elementos pasivos como pueden ser resistencias, bobinas, etc., hasta que el voltaje coincide con el voltaje de referencia que se espera en cada celda [Ibanez, 2013].

Los métodos activos de balanceo de voltajes transfieren instantáneamente la energía de las celdas que presentan un sobrevoltaje a otras celdas con la finalidad de igualar el voltaje de las celdas. En estos circuitos de balanceo se ocupan amplificadores, transistores etc [Barrade, 2002].

Los sistemas de almacenamiento de energía basados en supercapacitores juegan un papel muy importante en distintas aplicaciones como apoyo energético, vehículos eléctricos o híbridos por mencionar algunas. Para estas aplicaciones se requiere monitorear el estado de carga y la temperatura para mantener las celdas dentro del rango permitido y prolongar su tiempo de vida. Generalmente estos sistemas de almacenamiento de energía consisten en un número considerable de celdas interconectadas [Lu, 2009]. Si estas variables fueran medidas por un sistema microcontrolador, se presentarían problemas considerando que el voltaje de las celdas conectadas en serie puede llegar a ser cientos de volts dependiendo de la aplicación, estas diferencias pueden dañar el microcontrolador. En segundo lugar, es difícil para un microcontrolador procesar la adquisición de estos datos en tiempo real para cientos de parámetros, y en tercer lugar asegurar la precisión del estado de carga, por tanto, los tiempos de muestreo tienen que ser cortos [Choi, 2011].

El protocolo de comunicación bus CAN que es utilizado en la industria, vehículos y sistemas BMS por mencionar algunos, se debe a las ventajas que ofrece al poder transmitir la información de manera robusta y segura ofreciendo una alta inmunidad ante interferencias, requiriendo solamente de un par cables como medio de transmisión lo cual representa un ahorro físico al implementarlo en un sistema [Salunkhe, 2016].

En el presente trabajo se evalúan experimentalmente distintas topologías de balanceo de voltajes para SCs conectados en serie y posteriormente se muestra el diseño y construcción de un sistema de monitoreo de voltajes, estado de carga y temperatura para un banco de SCs conformado por 18 celdas basado en una unidad central, que se comunica con 3 unidades esclavas a través del protocolo de comunicación CAN. Cada unidad esclava recopila el voltaje y temperatura de cada celda. La unidad central se encarga de recoger los datos de las unidades esclavas para posteriormente ser mostrados en una pantalla LCD.

## 2. Métodos

### Balanceo de voltajes con diodos

Una de las soluciones más sencillas para realizar el balanceo de voltajes en supercapacitores conectados en serie, es conectando tres diodos en serie que a su vez se conectan en paralelo a cada SC como se muestra en la figura 3 para una rama de 5 SCs en serie [Uno, 2013].

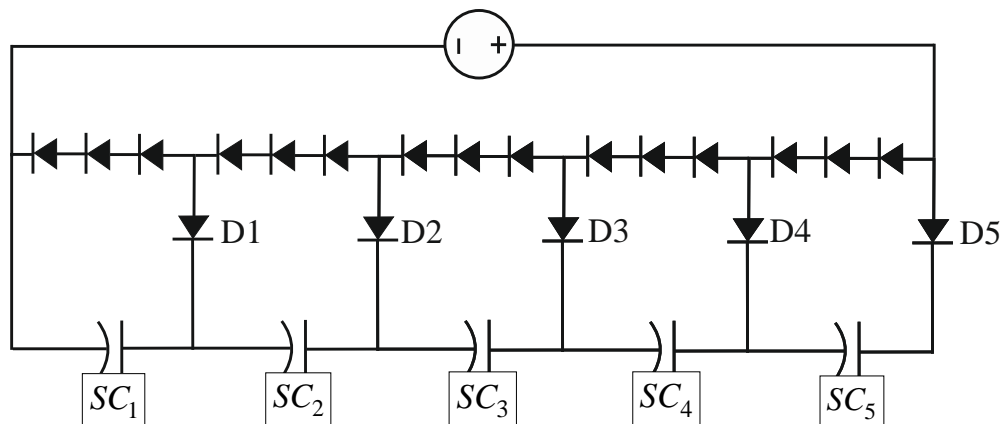


Figura 3 Diagrama de circuito de balanceo con diodos.



Cada uno de los diodos tiene un voltaje de polarización directa de 0.7 V. Una vez que la diferencia de voltaje entre ánodo y cátodo alcanza los 0.7 V, el diodo empieza a conducir corriente eléctrica, por lo tanto, si se tiene una conexión de 3 diodos conectados en serie se tendría un voltaje total de 2.1 V en cada SC. Los diodos D1-D5 funcionan como protección para permitir que la corriente fluya de la fuente de alimentación a cada SC y no de manera inversa.

Para obtener la capacitancia total real de la conexión en serie de 5 SCs de la figura 2 se utiliza la ecuación 1 considerando los valores reales de resistencia equivalente en serie total ( $ESR_T$ ) y capacitancia real en cada celda mostrados en la tabla 1.

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{SC_1} + \dots + \frac{1}{SC_5} = 635.51 \quad (1)$$

Tabla 1 Valores de capacitancia y ESR para 5 SCs.

Supercapacitor	Capacidad (F)	ESR (mΩ)	Voltaje nominal (V)
1	3164.3	0.266	2.7
2	3171.6	0.203	2.7
3	3184.1	0.199	2.7
4	3185.3	0.205	2.7
5	3190.2	0.205	2.7
Capacitancia total	635.81		
Resistencia total		1.078	
Voltaje nominal total			13.5

El voltaje total de carga ( $V_{carga}$ ) máximo es de 10.5 V debido a las limitantes de voltaje que permite la topología, por lo tanto proponiendo un voltaje nominal para cada celda de 2.7 V se obtiene el voltaje total de 13.5 V ( $V_T$ ), entonces se puede calcular con la ecuación 2 el estado de carga ( $E_{carga}$ ) máximo para esta topología de balanceo:

$$E_{carga} = \frac{(V_{carga})(100)}{V_T} = \frac{(10.5 V)(100)}{13.5 V} = 77\% \quad (2)$$

Si el banco de SCs puede alcanzar el 77.7 % de su capacidad total entonces con la ecuación 3 se determina la cantidad de capacitancia total para esta topología de balanceo ( $C_{T1}$ ).

$$C_{T1} = \frac{(E_{carga})(C_T)}{100} = \frac{(77.7\%)(635.81 F)}{100} = 494.02 \quad (3)$$

Con la ecuación 4 se calcula el tiempo aproximado que llevará en cargarse el banco de SCs proponiendo una corriente constante de 15 A ( $I_{carga}$ ):

$$T_{carga} = \left[ \left( \frac{V_{carga}}{I_{carga}} \right) - ESR_T \right] C_T = \left[ \left( \frac{10.5 V}{15 A} \right) - 1.078 m\Omega \right] 494.02 F = 345.2 s \quad (4)$$

### BQ33100

Otra solución para realizar el balanceo de voltajes es utilizando el chip BQ33100 mostrado en la figura 4 fabricado por Texas instruments, que permite controlar, monitorear y establecer una protección por sobre voltaje, sobre corriente y temperatura de 5 SCs conectados en serie [TI, 2018]. El chip viene integrado en el módulo EVMBQ33100 que contiene toda la instrumentación para conectar y balancear el voltaje de hasta 5 SCs conectados en serie.

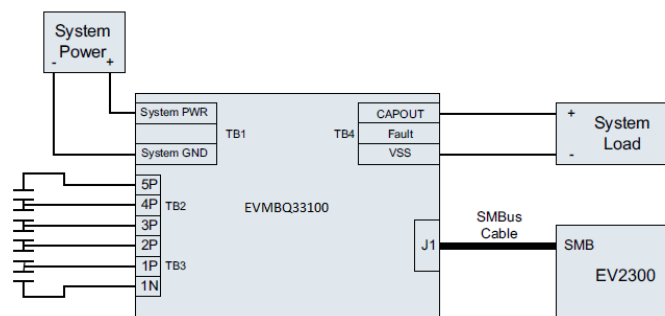


Figura 4 Topología de balanceo utilizando chip BQ33100 [TI, 2018].

Se requiere de una fuente externa para poder alimentar el circuito de balanceo, así como un módulo externo (EV2300) para establecer la comunicación y configurar los parámetros de balanceo desde la computadora. El balanceo de voltajes de este módulo es de tipo activo.

El estado de carga para 5 SCs conectados en serie para esta topología de balanceo se calcula utilizando nuevamente la ecuación 2 proponiendo un voltaje de balanceo máximo de 2 V por celda:

$$E_{carga} = \frac{(10\text{ V})(100)}{13.5\text{ V}} = 74.07\%$$

Dado que la conexión de SCs puede alcanzar el 74.07% de su capacidad total entonces con la ecuación 3 se puede determinar la cantidad de capacitancia total ( $C_{T2}$ ), tomando en cuenta el resultado de la ecuación 1 que corresponde al cálculo de la capacitancia total ( $C_T$ ) para la conexión de 5 SCs conectados en serie med:

$$C_{T2} = \frac{(74.07\%)(635.81\text{ F})}{100} = 470.9\text{ F}$$

### Balanceo de voltajes activo con amplificador operacional

Esta topología de balanceo de voltajes comprende un amplificador operacional, un divisor de voltaje conformado por dos resistencias que comparten el nodo común conectado a la entrada no inversora del amplificador, una resistencia limitadora de corriente conectada a la salida de cada amplificador y una resistencia de retroalimentación negativa conectada desde la entrada inversora del amplificador a la salida de este. En la figura 5 se muestra el diagrama de este circuito de balanceo [Thrap, 2004].

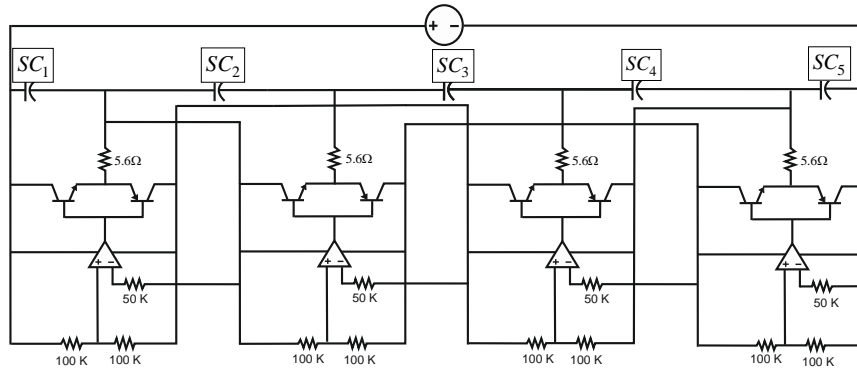


Figura 5 Diagrama esquemático de circuito de balanceo activo con amplificadores.

Los dos transistores conectados a la salida de cada amplificador npn y pnp proporcionan una etapa de ganancia para aumentar la salida de corriente del amplificador operacional al que están conectados y así poder reducir el tiempo en que se equilibran los voltajes en cada SC, principalmente cuando se tienen conectados supercapacitores con capacidades de 50 a 3000 F.

La configuración de los transistores es seguidor-emisor npn y pnp, las bases de los transistores están unidas entre sí mientras que el colector del transistor pnp está conectado al nodo negativo y el transistor npn conectado al nodo positivo correspondiente al circuito que está equilibrando el voltaje de uno de los SCs conectados. La etapa de ganancia está configurada para proporcionar una corriente de 300 mA en la salida de cada amplificador [Thrap, 2004].

Las resistencias en el divisor de voltaje son iguales para dividir igualmente el voltaje de carga a través de los supercapacitores, en este caso de 100 kΩ, la resistencia de retroalimentación es de aproximadamente la mitad de las resistencias divisoras (50 kΩ) de tal manera que esta resistencia pueda cancelar una entrada de corriente polarizada suministrada al amplificador operacional, la resistencia limitadora de corriente está diseñada para proteger los dos transistores pnp y npn en un valor de 5.6 Ω. Este circuito de balanceo tiene la ventaja de poder conectarse en cascada para poder equilibrar el voltaje de un número considerable de SCs conectados en serie [Thrap, 2004].

El voltaje total de carga para el circuito mostrado en la figura 4 es de 12.5 V ( $V_{carga}$ ) debido a que esta topología de balanceo tiene la limitante de poder balancear cada supercapacitor con un máximo voltaje de 2.5 V como se mencionó anteriormente. Utilizando la ecuación 2 se calcula estado de carga para esta topología de balanceo:

$$E_{carga} = \frac{(12.5 V)(100)}{13.5 V} = 92.59 \%$$

Si el banco de SCs está cargado al 92.59% de su capacidad total entonces se ocupa la ecuación 3 para determinar la cantidad de capacitancia almacenada ( $C_{T3}$ ) nuevamente tomando el valor de la capacitancia total por la ecuación 1:

$$C_{T3} = \frac{(92.59 \%)(635.81 F)}{100} = 588.69 F$$

Utilizando la ecuación 4 se calcula el tiempo aproximado que llevara en cargarse el banco de SCs a una corriente constante de 15 A:

$$T_{carga} = \left[ \left( \frac{12.5 V}{15 A} \right) - 1.078 m\Omega \right] 588.69 F = 489.9 s$$

## **Dimensionamiento del banco de SCs y diseño de la red CAN bus**

Para el dimensionamiento del módulo de SCs propuesto en este trabajo se considera la conexión de 18 SCs conectados en serie de un valor de 3000 F a 2.7 V cada SC, por lo tanto, la capacitancia total para este número de celdas se obtiene ocupando la ecuación 1:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{SC_1} + \dots + \frac{1}{SC_{18}} = 177.46 F$$

Considerando el valor de capacitancia real de cada SC proporcionado por el fabricante. El voltaje total ( $V_T$ ) se calcula mediante ecuación 5.

$$V_T = V_1 + \dots + V_{18} = 48.6 V \quad (5)$$

Posteriormente con la ecuación 6 se calcula la cantidad de energía almacenada ( $E$ ).

$$E = \frac{1}{2} C_T V_T^2 = 209576 J \quad (6)$$

Los dispositivos programables para implementar la red CAN es el microcontrolador PIC18F458 y dsPIC30F4013, ambos dispositivos cuentan con el controlador CAN integrado. Para determinar el dimensionamiento del número de nodos CAN necesarios para implementar el sistema de monitoreo, este se obtiene a partir del número de SCs conectados en serie. Por lo tanto, se utilizan 2 nodos CAN (esclavos) que reciben los valores de voltajes de 8 supercapacitores por nodo y un tercer nodo que recibe el voltaje de los últimos 2 SCs, el voltaje total de todas las celdas conectadas en serie y la temperatura del módulo.

La información recibida en los 3 nodos CAN viaja por el medio de transmisión CAN y llega a un cuarto nodo que es la unidad principal conformado por el dsPIC30F4013 que procesa la información recibida para enviarla a una pantalla LCD. En la figura 6 se muestra el diseño del sistema de monitoreo del módulo de SCs.

En la tabla 2 de manera detallada se muestran las características de la red CAN implementada para el monitoreo del banco de SCs. Se asigna un identificador para cada nodo esclavo y se especifica el tamaño del código de longitud de datos (DLC) por nodo, el número de byte asignado a cada entrada, así como el formato para la transmisión de datos estándar y la velocidad a 125 kbps.

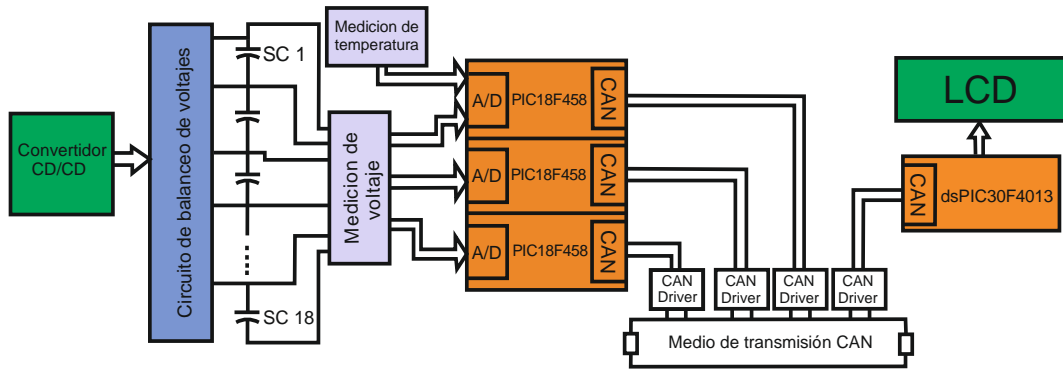


Figura 6 Diagrama a bloques sistema de monitoreo de banco de supercapacitores, red CAN.

Tabla 2 Características de la red CAN implementada en el banco de SCs.

Variable	ID	DLC	No. Byte	Nodo destino	Formato	Velocidad
Voltaje SC1-SC8	1	8	1-8	4	Estándar	125 Kbps
Voltaje SC9-SC16	2	8	1-8	4	Estándar	125 Kbps
Voltaje SC17-SC18	3	4	1-2	4	Estándar	125 Kbps
Voltaje total	3	4	3	4	Estándar	125 Kbps
Temperatura	3	4	4	4	Estándar	125 Kbps

### 3. Resultados

Se realizaron pruebas experimentales para cada una de las topologías presentadas anteriormente, implementando el arreglo de 5 SCs conectados en serie conformado por celdas de 3000 F a 2.7 V de la Marca Maxwell Technologies. Para realizar el proceso de carga y descarga se utilizó un convertidor CD/CD buck/boost (reductor/elevador) que trabaja con un voltaje variable hasta 50 V a una corriente constante máxima de 15 A y una potencia de 2 kW controlado por un DSP que genera las señales PWM para la conmutación de los transistores dependiendo del modo en que se requiera trabajar el convertidor, figura 7.

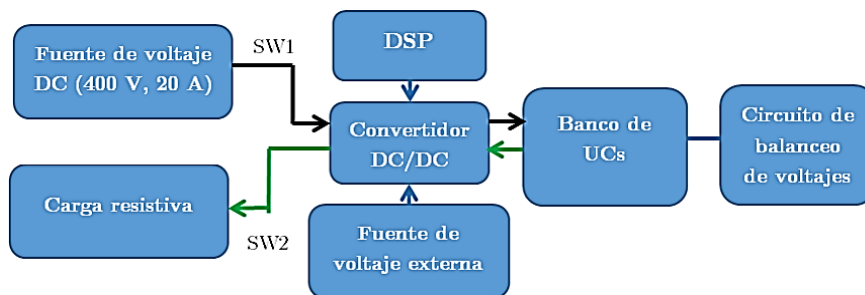


Figura 7 Diagrama a bloques del sistema para la carga y descarga de los SCs.

En la figura 8 se distinguen con puntos de color verde los elementos que integran el sistema para las pruebas de carga y descarga de los SCs: 1. Convertidor DC/DC Buck-Boost, 2. DSP, 3. Banco de SCs, 4. Fuentes de alimentación, 5. Interruptores, 6. Puntas de osciloscopio diferenciales.

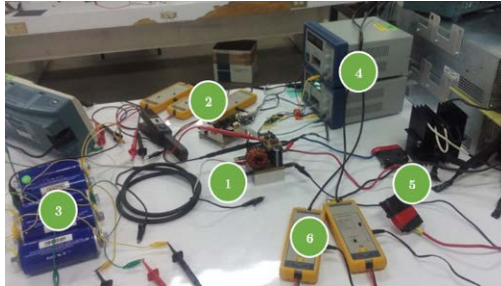


Figura 8 Implementación de sistema de carga del banco de SCs.

En la figura 9 se muestran la implementación de las 3 topologías de balanceo de voltajes propuestas en este trabajo, cada una conectada al módulo conformado por 5 SCs. En la figura 9a se muestra la implementación del circuito de balanceo pasivo con diodos, en la figura 9b se muestra la implementación del circuito de balanceo activo con amplificadores y en la figura 9c se muestra la implementación de la topología de balanceo activa utilizando el chip BQ33100.



a) balanceo de voltajes pasivo con diodos.



b) balanceo de voltajes activo con amplificadores

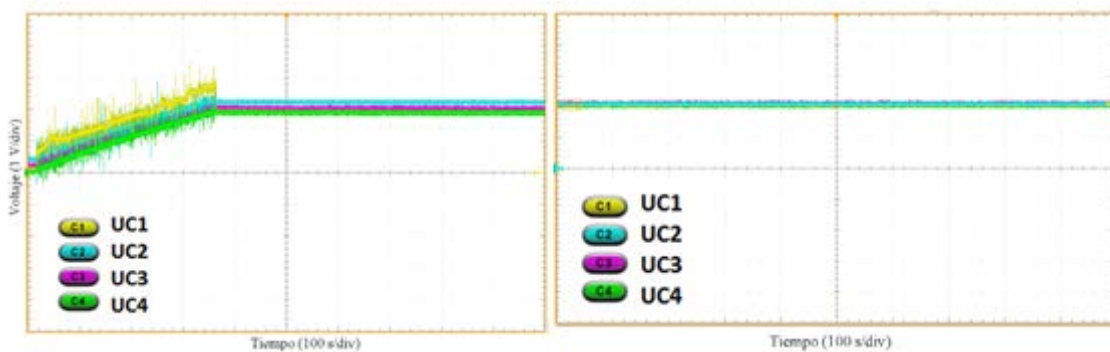


c) balanceo de voltajes activo con el chip BQ33100.

Figura 9 Implementación de las topologías de balanceo de voltajes.

Las pruebas de carga para cada topología de balanceo se realizan a una corriente constante de 15 A. En el primer ciclo de carga y descarga el voltaje inicial para cada supercapacitor es distinto, para tener un cálculo real de la capacitancia total del banco de SCs se consideran los valores reales de resistencia equivalente en serie (ESR) y capacitancia real de cada celda proporcionado por el fabricante.

En la figura 10 se observa el voltaje en cada celda durante el primer ciclo de carga para la topología de balanceo pasiva con diodos. Se realizó el monitoreo de 4 SCs (UC1-UC4) ajustando el osciloscopio a 100 s/div y 1 V/div. El tiempo aproximado en el que se cargan los SCs a una corriente constante de 15 A es de 350s que es aproximado a los cálculos obtenidos. Se puede observar la diferencia de voltajes desde el comienzo de la carga hasta finalizar la carga, después de un tiempo de 4 horas se observa en la figura 10b que los voltajes de cada celda están balanceados.



a) proceso de carga.

(b) voltajes balanceados.

Figura 10 Proceso de carga balanceo pasivo con diodos.

Para obtener los resultados utilizando el chip BQ33100, este cuenta con su propia interfaz gráfica para poder monitorear los voltajes. En la figura 11 se muestra la comparación en la lectura de los voltajes de cada SC antes de iniciar el balanceo de voltajes y después de que el módulo balanceara los voltajes. El tiempo aproximado para la realización de balanceo fue de 15 minutos.

En la figura 12 se observa el voltaje en cada SC durante el primer ciclo de carga para la topología de balanceo activa con amplificadores. Se realizó el monitoreo de 4 SCs (UC1-UC4) ajustando el osciloscopio a 100 s/div y 1 V/div. El tiempo aproximado en el que se cargan los SCs a una corriente constante de 15 A es de



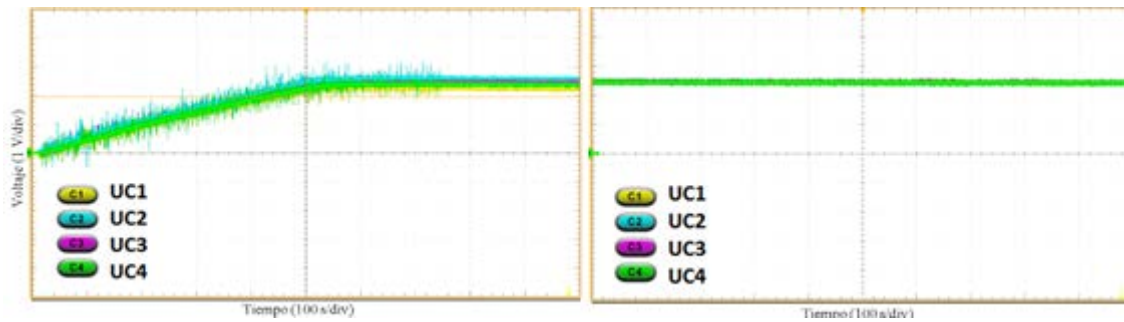
500 s que es aproximado a los cálculos obtenidos. Se puede observar la diferencia de voltajes desde el comienzo de la carga hasta finalizar la carga, después de un tiempo de 40 minutos se observa en la figura 12 b que los voltajes de cada celda están balanceados.

Name	Value	Unit	Log	Scan	Name	Value	Unit	Log	Scan
Capacitor Voltage 5	2042	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Capacitor Voltage 5	1999	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Capacitor Voltage 4	2051	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Capacitor Voltage 4	2000	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Capacitor Voltage 3	1900	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Capacitor Voltage 3	2000	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Capacitor Voltage 2	1910	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Capacitor Voltage 2	1999	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Capacitor Voltage 1	2100	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Capacitor Voltage 1	2000	mV	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

a) sin balanceo.

b) con balanceo.

Figura 11 Voltaje en cada supercapacitor.



a) proceso de carga.

b) voltajes balanceados.

Figura 12 Proceso de carga balanceo activo con amplificadores

Después de haber realizado las pruebas experimentales de cada topología de balanceo se determinó cuál de estas topologías sería la más adecuada a implementar en el prototipo final del banco con 18 SCs. En la tabla 3 se muestran las características generales de cada topología de balanceo implementada.

Tabla 3 Características generales de las topologías de balanceo de voltajes.

Topología	Tipo	Limitación de voltaje	Alimentación externa	Costo
Diodos	Pasivo	2.1 V	No	Bajo
Amplificador	Activo	2.5 V	No	Medio
BQ33100	Activo	No	Si	Alto

Tomando en cuenta las características y resultados obtenidos para cada topología, se selecciona la topología de balanceo con amplificador a implementar en el módulo de 18 SCs debido a que proporciona un buen funcionamiento reflejado en las pruebas experimentales, el costo y complejidad se encuentran en un rango viable para su implementación, y a pesar de tener como limitante de carga para cada SC a un voltaje de 2.5 V esto representa un estado de carga máximo del 92.59%.

En figura 13 se muestra el prototipo del banco de SCs conformado por 18 celdas conectadas en serie, la pantalla LCD permite observar el voltaje para cada celda, así como el voltaje total y temperatura. Si existe algún sobrecalentamiento o sobrevoltaje el módulo cuenta con indicadores que se activan ante estos valores no deseados.



Figura 13 Prototipo de banco de supercapacitores.

Para corroborar el funcionamiento de la red CAN diseñada para el banco de SCs se analizan las tramas de datos CAN que correspondan a la red planteada (tabla 2). Los resultados se muestran en la figura 14 donde se puede observar el número de identificador, DLC y la trama de datos para cada nodo.

Para verificar que las tramas de datos CAN de los tres nodos esclavo son recibidos por el nodo 4 de la red, se utilizó un analizador CAN de microchip. En la figura 15 se observan las tramas datos recibidas por el nodo 4 (RX). Los 3 identificadores (1x,2x,3x) y DLC corresponden a los 3 nodos esclavos encargados de enviar los valores de voltaje y temperatura del banco de SCs.

En figura 16 se puede observar el monitoreo del banco de SCs durante proceso de carga observando la temperatura, voltaje por celda y voltaje total del banco de SCs.

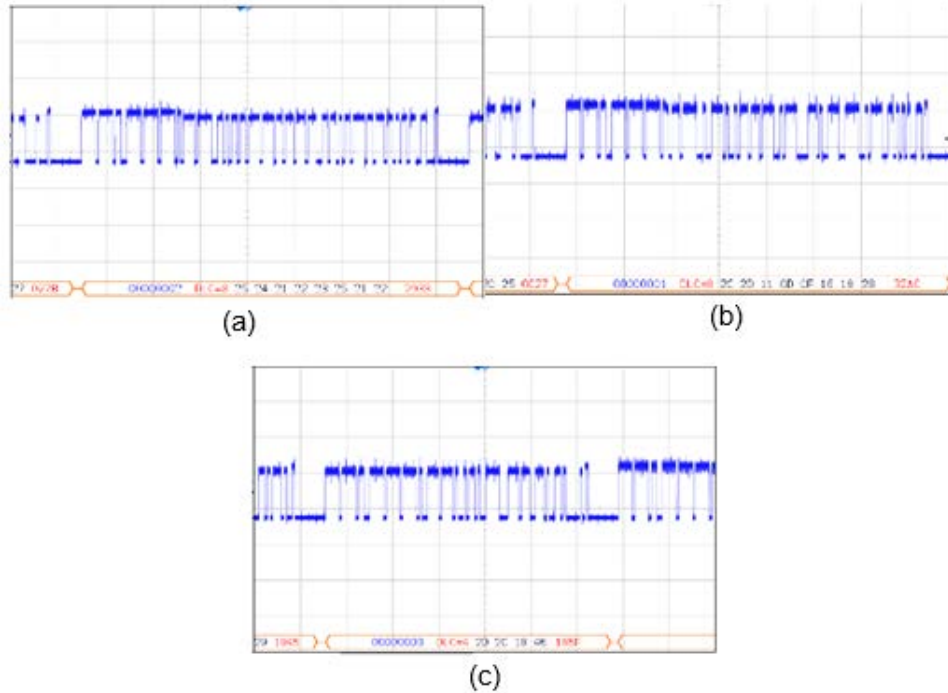


Figura 14 Trama de datos CAN (a) Nodo 1, (b) Nodo 2 y (c) Nodo 3.

CAN BUS Analyzer											
File View Tools Setup Help											
Rolling Trace											
TRACE	ID	DLC	DATA 0	DATA 1	DATA 2	DATA 3	DATA 4	DATA 5	DATA 6	DATA 7	TIME STAMP (sec)
RX	1x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	4000.4502
RX	2x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4482
RX	3x	4	0x01	0x00	0x01	0x42					4000.4462
RX	1x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	4000.4452
RX	2x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4432
RX	3x	4	0x01	0x00	0x01	0x41					4000.4413
RX	1x	8	0x00	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	4000.4402
RX	2x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4382
RX	1x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	4000.4372
RX	3x	4	0x01	0x00	0x01	0x41					4000.4352
RX	2x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4342
RX	1x	8	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4322
RX	3x	4	0x01	0x00	0x01	0x3F					4000.4302
RX	2x	8	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4252
RX	1x	8	0x01	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x00	0x01	4000.4222

Figura 15 Trama de datos CAN del nodo 4.



Figura 16 Sistema de monitoreo voltajes y temperatura, comunicación CAN banco de SCs.

## **4. Discusión**

Las topologías de balanceo de voltajes planteadas en este documento permitieron observar las ventajas y desventajas que puede ofrecer cada una al realizar su implementación, entre las características más importantes es el tiempo en que se realiza el balanceo de voltajes, la complejidad del circuito de balanceo y las pérdidas de energía que pueden presentarse en el caso de usar elementos pasivos como diodos. Un aspecto importante por mencionar es que una vez que los voltajes de cada SCs conectados en serie están equilibrados estos no necesitan ser balanceados durante varios ciclos de carga y descarga posteriores debido a que una vez balanceados los voltajes las condiciones iniciales de voltaje no cambian. Cuando se diseña un banco de supercapacitores es importante considerar la topología de balanceo a implementar debido a que esto determinará un balance entre el costo de su implementación y los requerimientos de la aplicación ya que pueden existir aplicaciones donde no sea necesario implementar un circuito de balanceo muy complejo. En lo que se refiere a la red CAN implementada con microcontroladores PIC18F458 y dsPIC30F4013 es bastante robusta, confiable y económica a parte de ofrecer la ventaja tener integrado el controlador CAN lo cual reduce tiempo en diseño, conexiones y espacio para su implementación.

## **5. Conclusiones**

La metodología aplicada para el diseño e implementación del banco de supercapacitores propuesto en este trabajo funcionó correctamente, se validó el funcionamiento de la topología de balanceo activa con amplificadores y se confirmó el envío de datos por el protocolo de comunicación CAN de la red implementada. Es importante mencionar que la integración de sistemas de monitoreo en módulos de almacenamiento de energía es indispensable para poder proteger los dispositivos y poder actuar en caso de tener un descontrol de estas. El uso de protocolo de comunicación CAN es una de las mejores opciones para enviar y recibir información en sistemas de monitoreo debido a su robustez y confiabilidad para poder transmitir grandes cantidades de información sin presentar pérdidas de datos.

Como futuros trabajos que puedan ofrecer un mejoramiento al sistema propuesto es la reducción de nodos CAN para él envió información de voltaje por celda, utilizando multiplexores con la intención de disminuir el número de nodos debido que para una aplicación donde el número de celdas de supercapacitores sea muy grande es más factible reducir el número de nodos. En lo que refiere al estudio de topologías de balanceo de voltajes sería importante profundizar un estudio de topologías de balanceo para conexiones en serie/paralelo ya que existen aplicaciones donde se requiere grandes cantidades de corriente y capacitancia que se logra realizando este tipo de arreglos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Barrade, P. Series connection of supercapacitors: Comparative study of solutions for the active equalization of the voltages, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, IEEE, 2002.
- [2] Choi, W. F., Yeung, Y. P., Cheng, K. W. E., & Wang, S. X. (2011, June). Energy management system using ultra-capacitor as energy buffer. In Power Electronics Systems and Applications (PESA). 4<sup>th</sup> International Conference on (pp. 1-3). IEEE. 2011.
- [3] Ibanez, F., Vadillo, J., Echeverria, J. M., & Fontan. Design methodology of a balancing network for supercapacitors. In Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), 2013 4<sup>th</sup> IEEE/PES (pp. 1-5). IEEE.2013.
- [4] Salunkhe, A. A., Kamble, P. P., & Jadhav, R. Design and implementation of CAN bus protocol for monitoring vehicle parameters. In Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), IEEE International Conference on (pp. 301-304). IEEE.2016.
- [5] Nikkhoo, M., Farjah, E., & Ghanbari, T. A simple method for parameters identification of three branches model of supercapacitors. In Electrical Engineering (ICEE), 2016 24<sup>th</sup> Iranian Conference on (pp. 1586-1590). IEEE.2016.

- [6] Lu, R. G., Pei, L., Ma, R., & Zhu, C. B. EV energy storage monitoring system based on distributed data acquisition. In Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC'09. IEEE (pp. 1386-1389). IEEE.2009.
- [7] Texas instruments. <http://www.ti.com/product/BQ33100> [consulta: miércoles 2 de mayo del 2018].
- [8] Rojas Dixon, W Juan. Diseño y construcción de conversor DC-DC para control de ultracapacitores en un vehículo eléctrico, Tesis de Licenciatura. Escuela de ingeniería, Pontifica Universidad Católica de Chile, 2002.
- [9] Thrap, Guy C. Charge balancing circuit. U.S. Patent No. 6,806,686, 19 Oct. 2004.
- [10] Uno, M. Energy storage-technologies and applications. (pp. 149-159).2013.
- [11] Yanqing Qu, Jianguo Z, Jiefeng Hu, Overview of Supercapacitor Cell Voltage Balancing Methods for an Electric Vehicle, IEEE, 2007.

# **IMPLEMENTACIÓN DE RED CELULAR DE BAJO COSTO PARA COMUNIDADES RURALES BASADA EN SDR Y OPENBTS**

## *IMPLEMENTATION OF A LOW COST CELLULAR NETWORK FOR RURAL COMMUNITIES BASED ON SDR AND OPENBTS*

### **Hugo Andrés Pérez Guerrero**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*hugoperez.nickell@gmail.com*

### **Dulce Mayra Janet Martínez García**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*dulce.mjmartinez@outlook.com*

### **Marco Aurelio Cárdenas Juárez**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*marco.cardenas@uaslp.mx*

### **Ulises Pineda Rico**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*u.pinedarico@gmail.com*

### **Enrique Stevens Navarro**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*estevens@galia.fc.uaslp.mx*

### **Armando Arce Casas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
*arcecasas@gmail.com*

## **Resumen**

El acceso a servicios de telecomunicaciones en México es hoy en día un gran reto. Principalmente, en comunidades rurales cuya ubicación geográfica y número de habitantes hacen que el despliegue de infraestructura no sea económicamente factible para los operadores de telecomunicaciones tradicionales. En este trabajo, se aborda el problema de la falta de servicios básicos de telefonía celular (i.e. voz y mensajes SMS) a través de la implementación de una estación base celular GSM basada en transceptores de radiofrecuencia de bajo costo y software de código abierto, que permiten su despliegue e implementación en comunidades de difícil acceso y pocos habitantes. Conjugando las tecnologías de Radio Definido por

Software (SDR, por sus siglas en inglés) con herramientas de software libre con base en OpenBTS, es posible configurar e implementar rápidamente una estación base de telefonía celular que permite a los usuarios realizar llamadas de voz y enviar mensajes de texto SMS entre los elementos de la red. Asimismo, la estación base les permite realizar y recibir llamadas de usuarios de operadores externos en cualquier parte del mundo a través de voz sobre IP. De este modo, es factible proporcionar telefonía celular en comunidades rurales actualmente incomunicadas.

**Palabras Claves:** Celulares, inalámbrico, OpenBTS, redes, telecomunicaciones.

### **Abstract**

*The access to telecommunications services in Mexico is nowadays a great challenge. Mainly in rural communities whose geographic location and number of inhabitants make the deployment of infrastructure not economically feasible to traditional telecommunications carriers. In this work, the problem of the lack of basic cellular telephony services (i.e. voice and SMS text messages) is addressed through the implementation of a GSM cellular base station based on low cost radio frequency transceivers and open source software, which allow their deployment and implementation in communities of difficult access and few inhabitants. By combining Software Defined Radio (SDR) technologies with free software tools based on OpenBTS, it is possible to quickly configure and implement a cellular telephone base station that allows users to make voice calls and send SMS text messages between the elements of the network. Likewise, the base station allows them to make and receive calls from users of external operators anywhere in the world through voice over IP. In this way, it is feasible to provide mobile telephony in rural communities that are currently isolated.*

**Keywords:** Cellular, networks, OpenBTS, telecommunications, wireless.

## **1. Introducción**

Recientemente, en México se han implementado diversas estrategias para impulsar en las próximas décadas tanto el desarrollo económico sustentable de las



regiones como el bienestar social basados en una economía del conocimiento [CONACYT, 2015]. En el caso de comunidades rurales, proporcionar el acceso a servicios de internet y telefonía celular a la población de México representa un gran reto en términos de economía, investigación, desarrollo tecnológico e innovación. Particularmente, según datos de la ENDUTIH, en el año 2015, tan solo el 40 % de los hogares en el estado de San Luis Potosí contaba con acceso a internet. Por otro lado, en el mismo año el 64 % de la población aseguró ser usuario de telefonía celular, contando con al menos un dispositivo. Para el resto de la población del estado, el acceso a este servicio le resulta incosteable o no hay servicio en su localidad. Estas cifras son muestras contundentes del rezago significativo en el acceso a estos servicios en el estado, principalmente, en comunidades rurales cuya ubicación geográfica y número de habitantes hacen que el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones no sea redituable para los operadores de telecomunicaciones tradicionales; por lo que están prácticamente incomunicadas. La ENDUTIH presenta cifras similares de penetración de mercado de servicios de internet y telefonía celular en prácticamente todos los estados del país [ENDUTIH, 2015].

Para subsanar las deficiencias de acceso a servicios de telecomunicaciones en comunidades rurales de México se han propuesto diversas soluciones. La más reciente es la denominada Red Compartida, cuyo objetivo es aumentar la cobertura de los servicios de telecomunicaciones. Una de las características de la Red Compartida es que permitirá reducir costos e incrementar la cobertura en regiones que carecen de servicios [SCT, 2015]. Sin embargo, se tiene previsto que la Red Compartida se implemente en lugares con población menor a diez mil habitantes y cubrirá solamente al 94 % de la población de México. Lo anterior, no garantiza que se implemente en las comunidades de menor número de habitantes (e.g. menor a 1000 habitantes) y, además, el 6 % restante de la población coincide con el número de habitantes indígenas de México.

En este contexto, el Plan Estatal de Desarrollo del Estado de San Luis Potosí 2015 – 2021, establece como uno de sus objetivos en el Eje Rector 1. San Luis Próspero, fortalecer la cobertura y accesibilidad de los servicios digitales; y como líneas de

acción promover la ampliación de la cobertura de servicios de telefonía e internet en coordinación con el Gobierno Federal y ampliar el acceso a la tecnología digital y a los servicios de telecomunicaciones de la población rural [COPLADE,2015]; ayudando a cumplir con los objetivos del Plan Nacional de Desarrollo 2013–2018 [PND, 2013].

Por lo anterior, en el presente trabajo se detalla la implementación de una red celular de bajo costo para comunidades rurales incomunicadas mediante el sistema OpenBTS [Ledema, 2015] y un radio definido por software (SDR, por sus siglas en inglés) [Stewart, 2015], autónoma e independiente de las operadoras tradicionales. La implementación de este sistema se logra con base en una composición de trabajos realizados por parte de fundaciones y organizaciones que desarrollan programas GNU (Licencia Pública General). El sistema OpenBTS es un conjunto de programas de software libre con funciones específicas, que al trabajar en paralelo y en comunicación constante logran la instauración de un sistema telefónico operativo, y a la par el despliegue de una cobertura de red inalámbrica por medio de la configuración de un radio definido por software (SDR), en la cual se logrará incorporar a los teléfonos móviles de los usuarios. A los usuarios inscritos a esta red se les puede brindar los servicios básicos de comunicación de una red de 2G (voz y datos), semejantes a los servicios que brindan las redes telefónicas tradicionales. En este trabajo se detallan los distintos bloques que componen el sistema OpenBTS, así como las tareas específicas que realiza cada uno dentro del sistema telefónico y sus configuraciones básicas. Además, se describe la implementación de la red de telefonía celular puesta en operación, así como los retos a enfrentar en un futuro.

## **2. Métodos**

El sistema OpenBTS se compone diversos programas y es capaz de brindar un servicio de telefonía celular similar a un sistema tradicional de comunicación telefónica, contando solamente con un equipo de cómputo y un SDR. El sistema OpenBTS es la unión de programas basados en software libre que se puede encontrar en la red de Git-Hub [GitHub, 2017], donde se encuentran todos los

repositorios en los que se está llevando a cabo el desarrollo de la aplicación por parte de los ingenieros responsables del proyecto. Para este trabajo se utiliza el *branch 5* para la implementación del sistema OpenBTS, ya que es la versión más actualizada al momento del desarrollo de este proyecto. Cabe mencionar que el sistema ya ha tenido actualizaciones, esto debido a nuevas versiones del sistema operativo en el cual se encuentra implementado (Ubuntu). El sistema utilizado en este trabajo está basado en un conjunto de librerías y programas que se detallan ampliamente en [Ledema, 2015]. El sistema OpenBTS principalmente necesita de dos equipos para funcionar de forma básica: un equipo de cómputo con una distribución de Linux Ubuntu y un Radio Definido por Software, que es necesario para transmitir todos los paquetes vía radio frecuencia (RF) por el espacio libre, también llamada interfaz de aire. Para el desarrollo de nuestro sistema se utiliza la versión 12.04 LTS de Ubuntu y un SDR modelo usrp N200.

En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques del sistema OpenBTS que se implementa. Se muestran todos los programas que involucran este sistema, los cuales son configurados para que sean capaces de comunicarse. Una vez se encuentran instalados todos los componentes en una computadora con el sistema operativo linux, y que a su vez cuenta con un SDR como uno de sus periféricos, se tiene garantizada una red funcional GSM; cumpliendo con todos los bloques que se necesita para brindar servicios de voz, SMS y datos ejecutado en un único sistema.

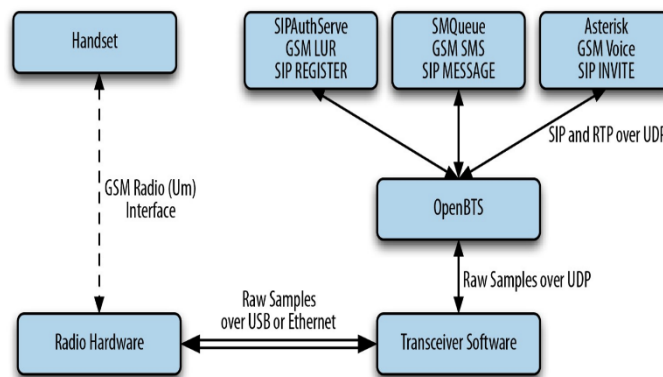


Figura 1 Componentes del sistema OpenBTS [Ledema, 2015].

La implementación de la red celular de bajo costo para comunidades rurales incomunicadas se encuentra conformada por diversos programas, que cada uno de ellos tiene un uso específico dentro del entorno de trabajo y ya cuentan con una pre-configuración:

- **OpenBTS.** Es el software más importante dentro del desarrollo de esta red celular de bajo costo. OpenBTS es el encargado de convertir todos los paquetes TCP/IP que son procesados por las otras aplicaciones para ser transmitidos a la interfaz de aire mediante el SDR y así poder transmitir las señales de telefonía celular en la red que brindará servicio a los usuarios. Por lo tanto, es el responsable de implementar la interfaz aérea mediante la configuración de los parámetros en el software, dichos parámetros serán los que dictaminen el comportamiento del SDR y a su vez de la comunicación directa con los teléfonos móviles mediante la radiación de la red con estándar GSM. Esta comunicación convierte los protocolos SIP y RTP en el lado de la red IP (equipo de cómputo) hacia la interfaz de aire con los protocolos del estándar GSM. El software OpenBTS proporciona la configuración al equipo SDR, lo que permite que se pueda administrar los aspectos más cercanos con la transmisión de la señal, pues es en esta aplicación donde van indexados los parámetros físicos que toma la red, como lo son: potencia de transmisión, frecuencia de transmisión, niveles de ruido, uso de canal, etc. Por último, es importante mencionar que el sistema OpenBTS se comunica a través de TCP/IP mediante puertos UDP con los demás programas que forman parte del sistema.
- **Asterisk.** El software Asterisk, es un programa de desarrollo libre bajo licencia GNU. Su principal función es realizar la conmutación de llamadas como una central PBX, y es un sistema de fácil implementación ya que todo el software se ejecuta en una sola computadora. Es un conmutador VoIP responsable de manejar las solicitudes SIP, establecer las llamadas y conectarlas entre sí, permitiendo establecer llamadas dentro y hacia fuera de nuestro sistema. Al igual que OpenBTS, esta aplicación también funciona mediante protocolos TCP/IP con comunicación mediante un puerto UDP por donde se transmiten

los datos necesarios para todas las comunicaciones SIP. Como toda implementación de un conmutador Asterisk se debe tener especial cuidado en la configuración del Dial-Plan, así como en las troncales por donde se estará llevando a cabo la comunicación, ya que son un conjunto de configuraciones que se le otorgan a Asterisk para que pueda generar sus funciones de conmutación hacia los usuarios finales.

- **Sipauthserve.** El sistema Sipauthserve es el encargado de la autenticación de los usuarios que se encuentren dentro de la red así como de asignarles una dirección lógica para que puedan ser llamados. *SIP Authorization Server* es una aplicación que procesa las solicitudes *SIP REGISTER* que OpenBTS genera cuando un teléfono intenta unirse a la red, cuando un teléfono se autentica con éxito, SIPAuthServe es responsable de actualizar la base de datos del registro del suscriptor con la dirección IP de la instancia OpenBTS que lo inició. Este sistema es el encargado de administrar las diversas cuentas que se encuentren en la red, como dar de alta usuarios y así mismo darlos de baja. Sipauthserve es un programa ejecutado en Python, el cual es sólo un controlador de bases de datos el cual por medio de comandos generas *queries* o consultas a la base de datos de configuración, tanto de OpenBTS como de Asterisk y Sipauthserve, lo que lo hace un sistema totalmente amigable. El programa Sipauthserve se encuentra en comunicación con los demás sistemas mediante comunicación en el puerto UDP, para el desarrollo de este trabajo serán pocos los cambios necesarios a realizar mediante esta plataforma, ya que la principal importancia de este programa es la administración de usuarios validados en la red y algunos pocos parámetros de configuración utilizados para trabajar en múltiples torres. Sipauthserve es un programa que forma parte fundamental de todo el sistema OpenBTS, entonces mientras mejor implementado se encuentre este sistema, mejor será la experiencia en el usuario final, lo que permite autenticaciones más rápidas.
- **Smqueue.** Este programa es el encargado de administrar el envío y recepción de mensajes de texto dentro del sistema. Smqueue es una aplicación que procesa solicitudes de SIP MESSAGE que OpenBTS genera cuando un

teléfono envía un SMS. Esta aplicación almacena los mensajes, los programa para su entrega en la red y los reprograma si el teléfono al que va dirigido no se encuentra disponible. Los parámetros necesarios a configurar para Smqueue son nulos, debido a que la configuración que presenta desde un inicio ya se encuentra funcional para poder ofrecer un servicio en una o múltiples torres. Sin embargo, una de las grandes limitaciones de este sistema se encuentra debido a que al contar con una línea VoIP para tener una comunicación externa, no se podrá contar con el servicio de mensajería al exterior de la red, puesto que en la comunicación SIP no están establecidos los mensajes de texto de forma tradicional.

### 3. Resultados

Cuando se implementa una red OpenBTS, tenemos que tener presente que la comunicación entre el computador y el SDR, así como la comunicación entre diversas computadoras (i.e. estaciones base celulares) se realiza por medio de protocolos IP, por lo que se vuelve necesario un direccionamiento correcto en las interfaces de los equipos para lograr la comunicación efectiva. Se realizaron 3 esquemas diferentes para la implementación de la red celular GSM:

- El primer caso presenta cuando todo el sistema OpenBTS se encuentra en un solo computador y la única conexión al exterior es al transceptor, en las figuras 2 y 3 se muestra la conexión física del sistema. En el diagrama sólo está conectada la centralita que cuenta con un equipo de cómputo con todo el stack de OpenBTS y el SDR usrp N200.

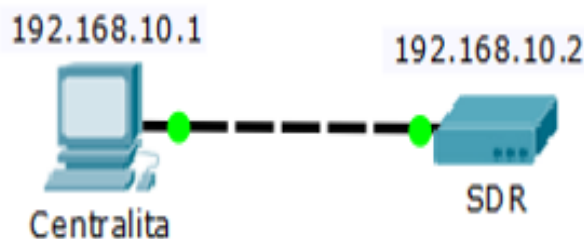


Figura 2 Diagrama de una centralita GSM.



Figura 3 Prototipo centralita GSM.

- En el segundo caso, se presenta una centralita en donde el sistema OpenBTS se distribuye en dos computadoras. Esto permite que la configuración se divida y sea manejable para su uso en la vida real, donde el conmutador se encuentra en un bloque *Central Services* (central de servicios) que está ubicado lejos de la torre de transmisión. En la figura 4 se muestra el diagrama del sistema para este caso.

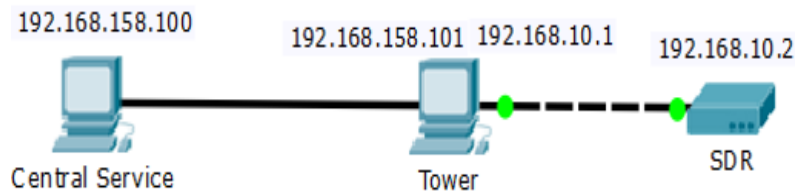


Figura 4 Diagrama de estación base GSM con una torre y una central de servicios.

Para este caso la Central Service es un equipo de cómputo con todo el *stack* excepto OpenBTS, se encuentra conectada a la computadora Tower o torre que consta de otra computadora conectada a un SDR; en ella sólo se ejecuta la instancia de OpenBTS.

- En el tercer caso se presenta la configuración con más de una torre como se ve en las figuras 5 y 6, aquí entran en juego más dispositivos, una computadora para la central de servicios, y 2 más para cada una de las torres conectadas su correspondiente SDR.

Como se puede observar, se replica en cierta forma el modelo para cada una de las torres, pero se debe tener cuidado con la dirección IP que se le asigna a cada una y notificar al central service la existencia de una nueva Torre.

Este sistema es mucho más completo que los anteriores, y se puede tomar como base para crear un sistema de telefonía GSM de manera local con múltiples torres, lo que se hace que se asemeje una red telefónica tradicional.

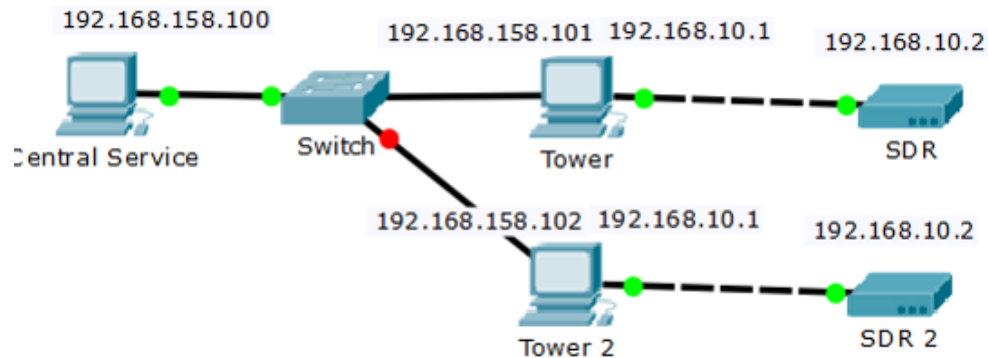


Figura 5 Diagrama de estación base celular GSM con dos torres.



Figura 6 Prototipo de una red GSM con dos torres.

- Finalmente, para el cuarto caso lo que se desea en un ambiente totalmente desarrollado, se anexa una parte más de comunicación, es decir una comunicación hacia el exterior, para lo cual se debe programar a Asterisk para aceptar, recibir y transmitir llamadas desde y para el exterior. Para este esquema se cuenta con un *router*, con el objetivo de funcionar como *switch* entre la red y como *router* para el exterior. Cabe recalcar que los puertos 5060-5053 y 10000-20000, deberán estar abiertos para transmisiones UDP y TCP. Así como tener cuidado con el correcto direccionamiento NAT, debido a que la comunicación en VOIP es muy sensible a este tipo de interferencias. Asimismo, se debe tener en cuenta que para tener acceso a la telefonía VOIP se debe contar con un Proveedor de Servicios de Internet y un Proveedor de



VOIP. En la figura 7 se muestra el diagrama para este cuarto caso y se especifica el lugar en donde se coloca el router.

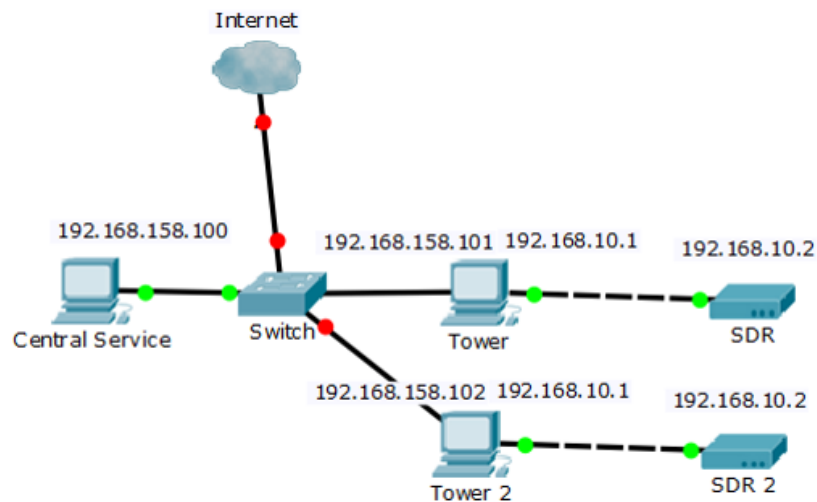


Figura 7 Diagrama de GSM con dos torres y salida a Internet.

Una vez teniendo en el prototipo de la red GSM puesto en marcha se realizaron pruebas para verificar su funcionamiento en un entorno controlado en el laboratorio, primero es necesario los dispositivos móviles ingresen a la red, para esto se debe registrar manualmente la red desde el móvil como se indica en los siguientes pasos, dichos pasos pueden variar un poco dependiendo de la interfaz gráfica del dispositivo móvil que se utilice. Primero se debe abrir el icono de configuración (*Config*), Luego se debe seleccionar la pestaña *Más redes*, posteriormente abrir la pestaña *Redes móviles*, dentro de ésta se debe seleccionar *Operadores de red* y a continuación seleccionar la opción *Buscar redes*. Con esta opción se desplegarán las redes que capta el móvil, entre las cuales debe aparecer un nombre similar a *00101, RANGE* que son los nombres por defecto que establece el OpenBTS para la red GSM, por ejemplo, la que se muestra en la figura 8. Con la red ya identificada sólo resta seleccionarla y esperar a que se realice el registro en OpenBTS.

Desde el CLI de OpenBTS, se ejecuta el comando *tmsis*, el cual permite visualizar los intentos de registro a la central, como se observa en la figura 9, visualizando el IMSI y el IMEI del dispositivo que lo intentó.

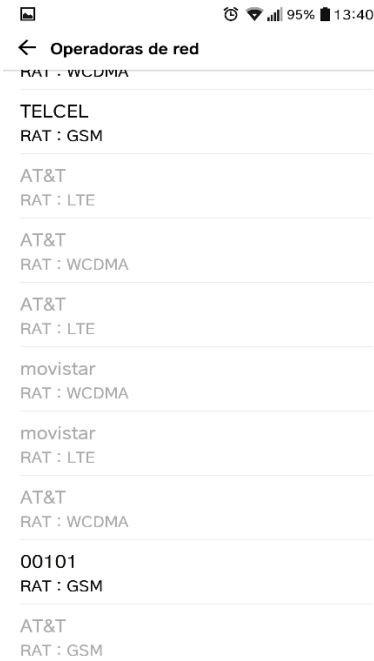


Figura 8 Conexión manual del dispositivo móvil a la red GSM.

```
OpenBTS> tmsis
```

IMSI	TMSI	IMEI	AUTH	CREATED	ACCESSED	TMSI_ASSIGNED
334020487258544	-	356144081856140	1	26m	6m	0
310260472947983	-	351501085634140	2	12m	12m	0
334020470897779	-	355603086128670	2	13m	13m	0

Figura 9 Intentos de registro en la red con el comando tmsis.

Una vez registrado, al usuario le llega un mensaje de texto donde se le da la bienvenida a la red GSM, un ejemplo se muestra en la figura 10. Asimismo, en la figura 11 se muestra un ejemplo de los usuarios registrados en la red. Finalmente, ya es posible realizar llamadas y enviar mensajes de texto entre usuarios registrados en la red, un ejemplo de llamada se muestra en la figura 12 y de envío de mensaje de texto en la figura 13.

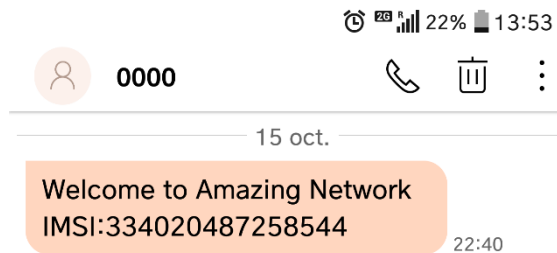


Figura 10 Mensaje de texto de bienvenida al usuario.

```
{
  "imsi" : "IMSI334020487258544",
  "msisdn" : "4442860225",
  "name" : "Dulce"
},
{
  "imsi" : "IMSI334090010413876",
  "msisdn" : "4442000010",
  "name" : "Diana"
},
{
  "imsi" : "IMSI334020487684025",
  "msisdn" : "4446666666",
  "name" : "Emmanuel"
},
{
  "imsi" : "IMSI334030239127017",
  "msisdn" : "4442017999",
  "name" : "David"
}
```

Figura 11 Usuarios registrados en la red GSM.

```
in new stack
-- Executing [s@CallLimit:2] Set("SIP/00101100010-00000001", "GROUP(B)=IMSI3
34020487684025") in new stack
-- Executing [s@CallLimit:3] GotoIf("SIP/00101100010-00000001", "0?VM") in n
ew stack
-- Executing [s@CallLimit:4] ExecIf("SIP/00101100010-00000001", "0?Return()")
) in new stack
-- Executing [s@CallLimit:5] Set("SIP/00101100010-00000001", "GROUP(A)=IMSI3
34020487258544") in new stack
-- Executing [s@CallLimit:6] GotoIf("SIP/00101100010-00000001", "0?VM") in n
ew stack
-- Executing [s@CallLimit:7] Return("SIP/00101100010-00000001", "") in new s
tack
-- Executing [4446666666@to-openBTS:3] Set("SIP/00101100010-00000001", "CALL
ERID(num)=4442860225") in new stack
-- Executing [4446666666@to-openBTS:4] Set("SIP/00101100010-00000001", "CALL
ERID(name)=4442860225") in new stack
-- Executing [4446666666@to-openBTS:5] Dial("SIP/00101100010-00000001", "SIP
/IMSI334020487684025@127.0.0.1:5062,3600,g") in new stack
== Using SIP RTP TOS bits 184
== Using SIP RTP CoS mark 5
== Called SIP/IMSI334020487684025@127.0.0.1:5062
== Spawn extension (to-openBTS, 4446666666, 5) exited non-zero on 'SIP/0010110
0010-00000001'
-- Executing [h@to-openBTS:1] Log("SIP/00101100010-00000001", "NOTICE,A-Numb
er=4442860225 A-Name= A-IMSI=IMSI334020487258544 B-Number=4446666666 B-Name= B-I
MSI=IMSI334020487684025 hangupcause=0 dialstatus=CANCEL hangupdirection=A durati
on=8 billsec=0") in new stack
[2017-11-13 00:47:33.723] NOTICE[20184][c-00000001]: Ext. h:1 @ to-openBTS: A-Nu
mber=4442860225 A-Name= A-IMSI=IMSI334020487258544 B-Number=4446666666 B-Name= B
-IMSI=IMSI334020487684025 hangupcause=0 dialstatus=CANCEL hangupdirectlon=A dura
tion=8 billsec=0
-- Executing [h@to-openBTS:2] Hangup("SIP/00101100010-00000001", "") in new
stack
== Spawn extension (to-openBTS, h, 2) exited non-zero on 'SIP/00101100010-0000
0001'
ubuntu*CLI> □
```

Figura 12 Llamada telefónica.

```
OpenBTS> sendsms 334020487258544 1234567 Necesitas ayuda
message submitted for delivery

OpenBTS> sendsms 334020487258544 1234567 Bienvenido a la red de emergencia
message submitted for delivery
```

Figura 13 Envío de mensaje de texto.

## 4. Discusión

La tecnología SDR ha establecido un nuevo paradigma en el diseño, desarrollo e implementación de sistemas de comunicación inalámbrica; haciendo posible la implementación de estaciones base de telefonía celular sin necesidad de utilizar los equipos de propósito específico tradicionales de los operadores de

telecomunicaciones. Convenientemente, con la tecnología SDR los costos de implementación, puesta en marcha y de operación de estaciones base de telefonía celular se reducen significativamente. Históricamente, el factor económico ha sido la principal limitante de los operadores para ofrecer servicios de telefonía celular en zonas rurales. Las regiones del mundo sin acceso a señales 2G o 3G son por lo general los lugares más remotos de la Tierra, donde el acceso a las comunidades es difícil. Por lo tanto, implementar en estos lugares la misma infraestructura que se encuentra en entornos urbanos no es factible económicamente, además de ser poco práctico. Lo anterior nos motiva a buscar soluciones alternas estaciones base celulares en estos lugares. Por este motivo, la tecnología SDR es adecuada para solventar la necesidad de proveer servicio de telefonía celular en comunidades rurales de difícil acceso y con un número de habitantes reducido. En algunas comunidades del sur de México se han creado redes de comunicación, las más representativas se encuentran en estado de Oaxaca, el cual tiene una orografía difícil y comunidades con alto grado de marginalidad las cuales no representan mercado factible para los proveedores de tecnologías celular tradicional. Algunas empresas y/o organizaciones civiles en México ya han implementado esfuerzos en reducir esta brecha de oportunidades impulsando proyectos completamente independientes de las telefónicas tradicionales [Rodríguez, 2018].

Algunas de estas implementaciones están desarrolladas en equipos de sistema global (GSM), software Libre y tecnología VoIP, las cuales son las principales tecnologías que permiten la implementación de la red presentada en este trabajo. [El Financiero, 2017] Un factor diferenciador de las anteriores redes, es que estas en su gran mayoría están llevadas por equipos extranjeros (Canadienses o Estadounidenses).

En este trabajo, se presenta una guía para la implementación de una red celular de bajo costo basada en OpenBTS mediante la integración de un radio definido por software; específicamente el USRP (Universal Software Radio Peripheral) N200 de Ettus Research. El USRP presenta dos características muy interesantes, por un lado, tiene un precio accesible, y por otro, permite el desarrollo de software

libre, además del que ya se encuentra disponible. Para la implementación del SDR, el fabricante Ettus proporciona drivers que se pueden compilar para diversos sistemas operativos, de forma que cualquier programa podría transmitir y recibir señales desde el USRP. El software GNU Radio, a partir de librerías libres existentes, permite la transmisión y recepción vía radio con el SDR de Ettus. En este trabajo se presentó el uso de OpenBTS y Asterisk para la implementación de una red celular GSM de manera local.

Diseñar una red GSM basada en OpenBTS tiene ciertos beneficios, ya que OpenBTS está diseñado para proveer sistemas de comunicación GSM bajo una configuración de red privada, de esta manera se puede implementar redes para comunicaciones corporativas privadas, locales o de emergencias en modo de espera o standby, algunas de esas ventajas son:

- Una rápida capacidad de poner en marcha una red celular con una celda.
- La capacidad de implementar múltiples celdas en varias zonas geográficas compartiendo un Vo-IP único.
- Celdas con bajo consumo de energía (desde 100 Watts).
- Una infraestructura basada en hardware Open Source y/o de reconocidas marcas con disponibilidad inmediata con proveedores locales o extranjeros.
- El software en su mayoría es de tipo Open Source.
- Es ideal para extender servicios de voz.
- Permite a empresas públicas o privadas crear su propia red 2G.
- Es una nueva opción para empresas de telecomunicaciones pequeñas o medianas que desean competir en mercado de telefonía celular a bajo costo.

Adicionalmente, es importante mencionar que la implementación del prototipo de estación base que se presenta en este trabajo puede fácilmente extenderse a otros lugares en donde no hay servicios de telefonía celular, por ejemplo, en invernaderos o algunos parajes turísticos que están alejados del área de cobertura de los operadores. Lo que representa una ventaja competitiva de la solución propuesta.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se presentó la implementación de una estación base celular GSM de bajo costo con la que se puede dar servicio de telefonía móvil y mensajes de texto a los habitantes de comunidades rurales incomunicadas, este diseño de red puede ser configurada para brindar servicios de comunicación básica en otros ambientes, tales como lo han hecho otros estudios para su aprovechamiento en desastres naturales o magno eventos en donde la capacidad de las redes celulares tradicionales se ven menguadas o inoperantes. La estación base implementada trabaja con una baja potencia y fue probada en laboratorio. Por lo tanto, es necesario incluir una etapa de potencia para amplificar la señal y probar el prototipo en un entorno real. Adicionalmente, la capacidad de la estación base debe incrementarse, en términos de cobertura y capacidad de usuarios. La potencia de la señal es un factor crítico en el enlace del teléfono con la torre, por lo que se deberá de llevar bajo un control estricto. Existen en la red algunos diseños referentes a la puesta en marcha de este sistema en eventos masivos con los que han diseñado estas soluciones. El sistema OpenBTS tiene licenciamiento abierto, la licencia de OpenBTS con la que se encuentra trabajando el sistema actualmente es una versión de laboratorio, esto provoca que solo sea utilizable una sola frecuencia y por lo tanto solo poder realizar alrededor de cuatro llamadas simultáneas, la versión liberada de OpenBTS tiene la posibilidad de utilizar multi-frecuencias y así poder incrementar la cantidad de usuarios en la red y las llamadas simultaneas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] GitHub (2017). GSM+GPRS Radio access network node: <https://github.com/RangeNetworks/openbts>.
- [2] B. Stewart, K. Barlee, D. Atkinson, and L. Crocket, Software Defined Radio using Matlab & Simulink. Strathclyde, UK: Strathclyde Academic Media, 2015.
- [3] Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado (COPLADE) de San Luis Potosí. Plan Estatal de Desarrollo 1015: [http://www.slp.gob.mx/plan2015-2021/assets/plan2016\\_eje1.pdf](http://www.slp.gob.mx/plan2015-2021/assets/plan2016_eje1.pdf).

- [4] Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. (2015). Agenda de Innovación de San Luis Potosí: <http://www.agendasinnovacion.org/wp-content/uploads/2015/01/Agenda-San-Luis-Potos%C3%AD.pdf>.
- [5] El financiero, Ellos llevan telefonía e internet comunitario en México, Omar Ortega 2017: <http://www.elfinanciero.com.mx/tech/ellos-llevan-telefonía-e-internet-a-zonas-marginadas-en-tecnología>.
- [6] Gobierno de la República. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013 - 2018: <http://pnd.gob.mx/wp-content/uploads/2013/05/PND.pdf>.
- [7] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares (ENDUTIH) 2015: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=19007>.
- [8] Ledema Michael, Getting Started with OpenBTS: BUILD OPEN SOURCE MOBILE NETWORKS, Foreword by Harvind Samra, Published by O'Reilly Media, Inc., First Edition, January 2015.
- [9] Milenio, La SCT impulsa sistema de telefonía rural en Oaxaca, Óscar Rodríguez: <http://www.milenio.com/estados/sct-impulsa-sistema-telefonía-rural-oaxaca>.
- [10] Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Red Compartida: <http://www.sct.gob.mx/red-compartida/index.html>.

# **ANÁLISIS DE LA POLARIDAD EN COMENTARIOS DE ESTUDIANTES UNIVERSITARIOS SOBRE EL DESEMPEÑO DE SUS PROFESORES**

*POLARITY ANALYSIS OF UNIVERSITY STUDENT COMMENTS ABOUT THEIR PROFESSORS PROFESSIONAL PERFORMANCE*

**Ángeles Belém Priego Sánchez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*abps@azc.uam.mx*

**David Eduardo Pinto Avendaño**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*dpinto@cs.buap.mx*

**Mauricio Castro Cardona**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*mayka2000@yahoo.com.mx*

**Martha Patricia León Arenas**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
*patricia.leon@correo.buap.mx*

## **Resumen**

El análisis de la polaridad, en cualquier tipo de comentario, es una tarea que está teniendo un gran auge, debido a que actualmente existe un fuerte interés en determinar automáticamente si las opiniones publicadas en medios públicos tienen un carácter positivo o negativo. La minería de opiniones se enfoca en determinar la polaridad de las publicaciones para, generalmente, dar seguimiento a la reputación de una entidad. Este artículo presenta los resultados obtenidos tras analizar la polaridad de comentarios emitidos por estudiantes universitarios en relación a su percepción sobre el desempeño de sus profesores frente a grupo. El enfoque del artículo es estudiar el rendimiento de diversos clasificadores supervisados en la tarea, anteriormente mencionada, con la finalidad de construir a mediano plazo un sistema para la clasificación automática de la polaridad de comentarios escritos por estudiantes universitarios. Los resultados obtenidos muestran que es posible crear un modelo de clasificación basado en máquinas de



vectores de soporte que clasifique correctamente la polaridad de comentarios universitarios con un porcentaje de efectividad cercano al 92% usando un conjunto balanceado de 10,000 datos de entrada.

**Palabras Clave:** Análisis de la polaridad, minería de opiniones, clasificación supervisada.

## **Abstract**

*Analysis of polarity, in any type of document, is a task that is having a great boom. Nowadays, there is a high interest in the construction of automatic methods for determining whether or not opinions published in public media have a positive or negative polarity. Opinion mining focuses on determining the polarity of publications, such as reviews or text comments, in order to analyze the reputation of a given entity. This paper presents the results obtained after analyzing the polarity of university student comments. The aim of this paper is to study the performance of different supervised classifiers in the aforementioned task in order to further construct a computational system for the automatic classification of comments polarity. The results obtained up to now show that it is possible to create a classification model based on support vector machines that correctly classifies the polarity of university student comments with a percentage close to 92%, using a balanced dataset of 10,000 samples.*

**Keywords:** *Analysis of polarity, opinion mining, supervised classification.*

## **1. Introducción**

El análisis de sentimientos es una tarea de clasificación de textos dentro del área del procesamiento del lenguaje natural cuyo objetivo consiste en detectar la polaridad (positiva, negativa o neutra), de una opinión dada por un cierto usuario. El conocer la opinión que una persona tiene hacia un producto o servicio es de gran ayuda para toma de decisiones, ya que permite, entre otras cosas, que posibles consumidores verifiquen calidad del producto o servicio antes de utilizarlo. En este artículo se presentan los resultados obtenidos para identificar automáticamente la polaridad de comentarios emitidos por estudiantes

universitarios en una encuesta correspondiente al desempeño de sus profesores. Para llevar a cabo la identificación de la polaridad de comentarios, se utiliza una técnica basada en aprendizaje automático, por lo que inicialmente se realiza un etiquetamiento manual de los comentarios y posteriormente estos resultados permiten alimentar diferentes algoritmos de aprendizaje con el fin de crear los modelos de clasificación que serán usados para etiquetar automáticamente nuevos comentarios, y determinar así su polaridad (positiva o negativa). Para llevar a cabo la tarea planteada, se diseñaron tres diferentes conjuntos de datos de entrenamiento conformados de una cantidad balanceada de comentarios positivos y negativos (C1000, C5000 y C10000), creados a partir de un conjunto base de 201,146 comentarios proporcionados por el Programa Institucional de Evaluación Académica (PIEVA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP). Dado que esta investigación se encuentra enmarcada en el ámbito de la minería de opinión, se presenta a continuación el estado del arte relacionado con el trabajo. Dentro de los estudios centrados en la clasificación de opiniones, positivas o negativas, se encuentra el presentado en [Pang, 2002], una de las primeras investigaciones sobre el análisis de sentimientos en la cual se utilizan datos de críticas de películas encontradas en la Web; éstos son empleados en tres algoritmos de clasificación, superando los *baselines* producidos manualmente por un humano. Publicaron su trabajo sobre la clasificación de documentos en base al sentimiento expresado en éstos. Analizaron reseñas sobre películas, encontraron que las técnicas de Aprendizaje Automático mejoran el rendimiento de las líneas base generadas por los expertos humanos. Emplearon tres algoritmos de Aprendizaje Automático: Naïve Bayes (NB), Máxima Entropía (ME) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).

Uno de los pioneros que introdujeron el término de Análisis de Sentimientos fue el presentado por [Nasukawa & Yi, 2003]. En esta publicación definen esta tarea como encontrar expresiones de sentimientos para un sujeto dado y determinar la polaridad de estos. En las investigaciones anteriores a ésta, se realizaba el análisis de la polaridad general de un documento. Sin embargo, en este enfoque se trata de identificar la opinión de cada sujeto mencionado en el texto.

En [Minqing & Bing, 2004], se expuso una propuesta para minar y resumir reseñas de consumidores. Los objetivos de este trabajo fueron encontrar las características a las cuales se hacían referencia en las críticas, identificar los enunciados que expresaban opiniones y polaridad sobre las mismas y resumir los resultados. Se propuso la creación de una pequeña lista de adjetivos “semilla” etiquetados manualmente dependiendo si expresan sentimiento positivo o negativo. Posteriormente esta lista es aumentada usando WordNet [Miller et al., 1990].

Las opiniones, fabricadas mediante una conversación o comentario, es posible consultarlas a través de foros, blogs o redes sociales, estas últimas siendo la novedad y teniendo el mayor auge actual. Un trabajo basado en una colección de entradas de blogs, es el presentado en [Fernández, 2011] que realiza el análisis de sentimientos y minería de opiniones en dichas entradas, mostrando la relevancia de los sistemas de aprendizaje automático como recurso para la detección de información de opinión. En [Carrillo-de-Albornoz, 2016], se propone una metodología para evaluar resúmenes en el contexto del monitoreo de la reputación en línea, la cual beneficia los informes de reputación.

Actualmente, muchos investigadores del ámbito de la recuperación de información y la lingüística computacional han focalizado sus investigaciones en las redes sociales, especialmente en Twitter, dada la gran cantidad de publicaciones que se generan día a día. De esta manera, se hace necesaria la creación de herramientas capaces de gestionar, analizar y manipular toda esta información disponible, además de categorizarla de acuerdo al contenido generado por el usuario, y -en relación a las opiniones- identificar los matices de opinión vinculados a la posición de los usuarios con respecto a algún tema. Esto se basa en el constante monitoreo de los mensajes producidos en las redes sociales. Hasta el 2014, estos sistemas eran evaluados en el marco de la competencia RepLab [Amigó, 2013] para tuits en inglés y en español. A pesar de incluir el idioma español, dentro de la competencia, la mayoría de los trabajos reportados en la literatura se centran en el idioma inglés. En este sentido, los diferentes métodos aplicados para la clasificación de opiniones de tuits en inglés han sido aplicados para el idioma español [Fernández, 2013]. Estos métodos han considerado desde la utilización de n-gramas de palabras, la

reducción de éstas a su raíz (*stemming*) e incluso su sustitución. Sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados dado que los tuits son muy difíciles de tratar, sobre todo debido a su brevedad y falta de contexto. Tal y como regularmente pasa con lo métodos supervisados, es difícil encontrar conjuntos de datos manualmente anotados para entrenar modelos automáticos de clasificación. Sin embargo, este problema ha disminuido al contar con ambientes de competencias internacionales relacionadas con el análisis de sentimientos. El foro de SemEval (International Workshop on Semantic Evaluation) es sin duda un espacio que ha dado difusión al estudio de la polaridad en Tweets. Desde el año 2013 ha contado con soporte de evaluación de polaridad en Tweets. En particular, en el año 2017, se presentaron 58 equipos con diferentes propuestas, las cuales son resumidas en [Rosenthal et al., 2017]. La más reciente edición de SemEval ha destacado por tener una sección (con tres tareas) dedicadas exclusivamente al análisis de la característica afectiva en Tweets. En [Mohammad et al., 2018] puede verse una descripción completa de los 75 equipos que participaron en la tarea 1 de SemEval denominada "Affect in Tweets". Ellos describen la manera en que se construyeron y etiquetaron manualmente los corpora para los idiomas Inglés, Árabe y Español, así como las técnicas usadas en las 319 ejecuciones presentadas por los equipos. Cada uno de los equipos ha reportado de manera individual su trabajo, sin embargo, referirse a 58 artículos del año 2017 y 75 artículos del año 2018 sería demasiado y es por esta razón que remitimos al lector a los reportes que resumen la participación de todos los equipos.

En [Sidorov, 2012] se presenta un enfoque, para la minería de opinión de tuits en español, basado en el funcionamiento y diferentes configuraciones de algoritmos de aprendizaje automático. A pesar de que los algoritmos empleados presenten buenos resultados para el idioma inglés, en este trabajo se muestra como los diferentes tamaños de *n-gramas*, la longitud del corpus, el número de clases de sentimientos, el corpus balanceado con respecto al corpus no balanceado y los diferentes dominios (configuraciones) afectan la precisión del algoritmo.

La generación de léxicos de palabras, que se encuentren anotadas con su correspondiente polaridad, es otro enfoque en el que se han orientados diferentes

investigadores y que ha colaborado al monitoreo de las opiniones en los comentarios. En el caso del español, ejemplos de estos enfoques son los presentados en [Pérez-Rosas, 2012] y [Brooke, 2009].

Hacer uso de los datos generados por personas, comentarios, es una gran oportunidad para ganar tiempo en las decisiones tomadas, debido a que proporcionan información que puede ser utilizada en diferentes ámbitos. A partir de los datos adquiridos se puede realizar un análisis automático y generar estadísticas sobre la opinión colectiva (positiva o negativa) de un producto, servicio o persona. Dicho análisis es de gran utilidad para los analistas de medios, desde la disminución de tiempos hasta la disminución de costos. Por ejemplo, en los estudios manuales se nota un consumo inmenso de tiempo y costos.

Por ello, en este artículo se presenta un análisis de diferentes modelos de clasificación automática que determina el rendimiento de cada uno de ellos en la tarea de identificación automática de la polaridad de comentarios hechos por estudiantes universitarios.

El resto de este artículo está organizado como sigue. La Sección 2, presenta la descripción de los métodos y datos usados en los experimentos. La Sección 3, presentan los resultados obtenidos. En la sección 4 se presenta la discusión de estos resultados usando datos concentrados globales. Finalmente, en la Sección 5 se exponen las conclusiones y el trabajo futuro.

## **2. Métodos**

En esta sección se presentan los métodos de clasificación automática analizados para la detección automática de la polaridad en comentarios de estudiantes universitarios, así como el conjunto de datos usados en el experimento.

### **Descripción de los datos**

El instrumento que sirve de base para el análisis, realizado en este artículo, fue diseñado por Programa Institucional de Evaluación Académica (PIEVA) de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y es utilizado para obtener

información de los procesos de enseñanza aprendizaje; con la finalidad de posibilitar las estrategias de intervención que permitan mejorar la función docente. El programa surgió desde el 2002 y hasta la fecha ha ido mejorando en cuanto a su validez y confiabilidad; lo que ha permitido mejoras sustanciales en el desempeño docente. El Instrumento PIEVA, evalúa las siguientes dimensiones:

- **Mediación.** Entendida como la serie de acciones que el docente plantea al estudiante, en función de lo que ya conoce y hace este último, para transformar y ampliar su nivel de conocimientos sobre las temáticas abordadas y su realidad próxima.
- **Estrategias y recursos.** Plan de acción que se lleva a cabo para lograr un determinado fin a largo plazo; se especifican aquí los recursos que el profesor emplea de forma reflexiva y flexible para el logro de aprendizajes significativos.
- **Resultados de aprendizaje.** El trabajo del docente está centrado en el logro de resultados tangibles para el estudiante en cuanto al desarrollo de sus habilidades sus conocimientos y sus actitudes
- **Planeación.** La actividad docente requiere de la planeación, esto es: la articulación de los objetivos, contenidos del curso, metodologías, estrategias educativas y recursos, estableciendo una secuencia de actividades que permita el aprendizaje deseado y el aprovechamiento del tiempo.
- **Evaluación de aprendizajes.** La evaluación de aprendizajes: declarativo, procedimental y actitudinal-valoral, debe contemplar –al menos- los siguientes principios: dar a conocer oportunamente los criterios bajo los cuales se acreditará la materia, ser justa (los mismos para todos), favorecer la retroalimentación oportuna que permita los reajustes cognitivos y de proceso y ser objetiva (centrada en lo que se espera se aprenda de acuerdo al programa).
- **Ejes transversales.** Son el conjunto de características que definen a un modelo académico educativo y que para el caso que se presenta, corresponden al denominado Modelo Universitario Minerva (MUM). Los considerados son: Formación Humana y Social (FHS), Desarrollo de Habilidades del Pensamiento Complejo (DHPC), Desarrollo de habilidades en

el uso de las tecnologías de la información y comunicación (DHTIC), el empleo de una segunda lengua, educación para la investigación y cultura emprendedora.

- **Relacional.** El ejercicio docente requiere un conjunto de habilidades sociales para interactuar respetuosamente con los estudiantes, a saber: motivación, reconocimiento y respeto a la diferencia y al diálogo, incluyendo la comunicación asertiva y la resolución de conflictos.
- **Cumplimiento Institucional.** Compuesto de 4 indicadores: Cumplimiento del horario, asistencia, cobertura del programa y dominio de la materia.

El cuestionario se responde en una escala del 1 al 4 y de acuerdo con las respuestas se calcula un Índice de Satisfacción Ponderada (ISP) que es el que se utiliza junto con otros criterios, para evaluar el desempeño del docente en el aula. Al finalizar el cuestionario existe una sección para comentarios abiertos a decisión del estudiante.

Dado que el objetivo de este trabajo es el análisis de la polaridad de comentarios de estudiantes universitarios, es necesario contar con una etiqueta manual que indique si el comentario es positivo o negativo. Para ello se construyó una tipología de clasificación –manual, y que parte del análisis de contenidos-, que contiene las siguientes categorías:

- **Ámbito.** Si es acerca de lo académico del profesor, de PIEVA o relacional.
- **¿Sobre qué?** Sobre la materia, sobre el profesor sobre otro profesor sobre la institución o sobre PIEVA
- **Tipo.** Positivo, negativo, denuncia, sugerencia y suplantación.
- **Atención.** Director, academia, escuela de formación docente o al mismo maestro.

Un comentario puede ser clasificado, por ejemplo, como del ámbito académico, referirse al profesor y, además, ser de tipo negativo y/ o emitir una sugerencia. Con este tipo de encuestas, realizadas en la BUAP, se puede describir el desempeño del docente. Para lo cual no solo se toma en cuenta el ISP sino, también, el tipo

de comentario - ser positivo, negativo, de denuncia o de suplantación (da clase otro profesor)- que los estudiantes hacen de él.

Como se mencionó, con anterioridad, el principal conjunto de datos, que se utilizará para el análisis de la polaridad, es el que contiene cada uno de los comentarios proporcionados por los estudiantes universitarios tras llevarse a cabo la encuesta. El conjunto de datos, de los comentarios utilizado, consta de 201,146 comentarios totales, los cuales fueron etiquetados manualmente por expertos en alguna de las dimensiones comentadas anteriormente (positivo, negativo, denuncia, suplantación). Para los fines de este artículo, el análisis de la polaridad, se emplearon únicamente los comentarios del tipo positivo y negativo, quedando al final un subconjunto de 136,640 comentarios totales, clasificados en 110,556 positivos y 26,084 negativos. Un ejemplo de los mensajes proporcionados por los alumnos y el tipo de mensaje puede observarse en la tabla 1.

Dado los ejemplos de la tabla 1, se puede observar que existen diversas características al momento de la escritura de los comentarios. Por lo cual, es necesaria una etapa de preprocesamiento que permita homogeneizar el comentario y poder ser utilizado.

Tabla 1 Ejemplo del conjunto de datos.

Comentario	Tipo	
	Positivo	Negativo
<i>“excelente profesor tiene un manejo increíble del tema ya que la clase pasaba tan rapido porque es muy bueno en clase”</i>	X	
<i>“en relacion al trato con los alumnos considero que es elitista e inconstante en su estado de animo, lo que nos perjudica por el trato social que nos presenta”</i>		X

Para esta etapa, se llevó a cabo una conversión de todos los comentarios a minúsculas, se realizó una *tokenización* y sobre todo se balanceó el conjunto de datos. Dado que, como se pudo observar, existen más comentarios positivos que negativos, y, por tanto, el corpus está desbalanceado. Esta diferencia, en la cantidad de datos para cada clase, puede tener un impacto negativo en la



generación de resultados. Por lo tanto, para la obtención de mejores resultados, se obtuvieron 3 subconjuntos de datos más pequeños y balanceados: el primero denominado C1000 consiste en 1,000 comentarios (500 negativos y 500 positivos); el segundo se ha llamado C5000 y consiste de 5,000 comentarios (2,500 positivos y 2,500 negativos); finalmente, el tercero se llama C10000 y contiene 10,000 comentarios en total (5,000 positivos y 5,000 negativos). Uno de los objetivos, al tener diferentes corpora, es observar el rendimiento de los clasificadores supervisados a medida que se incrementan el número de muestras sobre las cuales se lleva a cabo el proceso de entrenamiento y prueba.

### **Descripción de los clasificadores empleados**

Las técnicas de aprendizaje automático, o supervisado, son capaces de aprender el proceso humano para clasificar, entre otras cosas, la polaridad en comentarios de estudiantes universitarios. Este proceso requiere de la extracción de características a partir de un corpus que regularmente es anotado de manera manual (corpus supervisado o de entrenamiento). Se genera, de esta manera, un modelo de clasificación que puede posteriormente ser utilizado para clasificar nuevas muestras de las cuales se desconoce su clase final. En este caso, las muestras de entrenamiento y las nuevas muestras se consideran que pueden ser clasificadas automáticamente como solo una de las dos siguientes clases: positivo o negativo.

En los experimentos llevados a cabo, se consideró utilizar el corpus manualmente etiquetado para conformar el corpus de entrenamiento y el corpus de prueba en porcentajes del 80% y 20%, respectivamente. Se usó una técnica conocida como validación cruzada a *v* capas (*v-fold cross-validation*), la cual usa el corpus total y lo subdivide, tal y como se mencionó anteriormente, en corpus de entrenamiento y prueba en *v* ocasiones (se utilizó *v*=10 para los experimentos presentados en este artículo). Los valores obtenidos de las 10 ejecuciones fueron promediados y presentados como resultados finales, resultados que se mostrarán en sección 3. Con el fin de tener una perspectiva del tipo de clasificador que puede tratar mejor el problema, de clasificación de la polaridad, se han seleccionado los siguientes

cuatro algoritmos de aprendizaje (cada uno perteneciente a un tipo de clasificador diferente: Bayes, Lazy, Functions y Trees):

- **Naïve Bayes:** es un clasificador probabilístico basado en el teorema de Bayes y algunas hipótesis simplificadoras adicionales [Manning & Schütze, 1999].
- **K-Star:** Este es el clasificador de los k vecinos más cercanos con una función de distancia generalizada [Manning & Schütze, 1999].
- **SMO:** Se trata de un algoritmo de optimización secuencial mínima para la clasificación de vectores soporte [Manning & Schütze, 1999].
- **J48:** Es un algoritmo usado para generar un árbol de decisión [Manning & Schütze, 1999].

Todos los textos fueron representados por medio de un vector de frecuencias de n-gramas, con valores para  $n = 1, 2$  y  $3$ . Las frecuencias superiores a dos, para los n-gramas, son consideradas para el vector de características. Los resultados obtenidos en los experimentos se presentan a continuación.

### 3. Resultados

Esta sección presenta los resultados obtenidos después de haber utilizado cada uno de los tres corpora de evaluación (C1000, C5000 y C10000). En la tabla 2 se muestran la cantidad de instancias clasificadas correcta e incorrectamente para el corpus C1000, por cada uno de los cuatro clasificadores supervisados utilizados (Naïve Bayes, K-Star, SMO y J48).

Tabla 2 Resultados de la clasificación usando el corpus C1000.

Clasificador	Tipo	Instancias correctas	Instancias incorrectas
Naïve Bayes	Bayes	76.2%	23.8%
K-Star	Lazy	74.5%	25.5%
<b>SMO</b>	Functions	<b>86.7%</b>	13.3%
J48	Trees	79%	21%

En la tabla 3 se muestran la cantidad de instancias clasificadas correcta e incorrectamente para el corpus C5000, por cada uno de los cuatro clasificadores supervisados utilizados (Naïve Bayes, K-Star, SMO y J48). Nuevamente, es el

modelo de clasificación basado en máquinas de vectores de soporte (SMO) el que resulta vencedor con un porcentaje de clasificación del 91.54%, es decir, 4,577 muestras de un total de 5,000 fueron clasificadas correctamente. La tasa de error de este clasificador es del 8.46%, es decir, 423 errores de un total de 5,000 muestras. En particular, 175 muestras que eran positivas fueron clasificadas erróneamente como negativas, y 248 muestras que eran negativas fueron clasificadas incorrectamente como positivas.

Tabla 3 Resultados de la clasificación usando el corpus C5000.

<b>Clasificador</b>	<b>Tipo</b>	<b>Instancias correctas</b>	<b>Instancias incorrectas</b>
Naïve Bayes	Bayes	78.04%	21.96%
K-Star	Lazy	77.84%	22.16%
<b>SMO</b>	Functions	<b>91.54%</b>	8.46%
J48	Trees	85.38%	14.62%

La tabla 4 muestra cantidad de instancias clasificadas correcta e incorrectamente para el corpus C10000, por cada uno de los cuatro clasificadores supervisados utilizados (Naïve Bayes, K-Star, SMO y J48). De nuevo, el modelo de clasificación basado en máquinas de vectores de soporte (SMO) resulta vencedor con un porcentaje de clasificación del 91.95%, es decir, 9,195 muestras de un total de 10,000 fueron clasificadas correctamente. La tasa de error de este clasificador es del 8.05%, es decir, 805 errores de un total de 10,000 muestras. En particular, 337 muestras positivas fueron clasificadas erróneamente como negativas, y 468 muestras que eran negativas fueron clasificadas incorrectamente como positivas.

Tabla 4 Resultados de la clasificación usando el corpus C10000.

<b>Clasificador</b>	<b>Tipo</b>	<b>Instancias correctas</b>	<b>Instancias incorrectas</b>
Naïve Bayes	Bayes	77.26%	22.74%
K-Star	Lazy	80.37%	19.63%
<b>SMO</b>	Functions	<b>91.95%</b>	8.05%
J48	Trees	87.3%	12.7%

#### **4. Discusión**

En la figura 1 se puede apreciar el rendimiento de todos y cada uno de los clasificadores evaluados sobre tres diferentes corpora (C1000, C5000 y C10000).

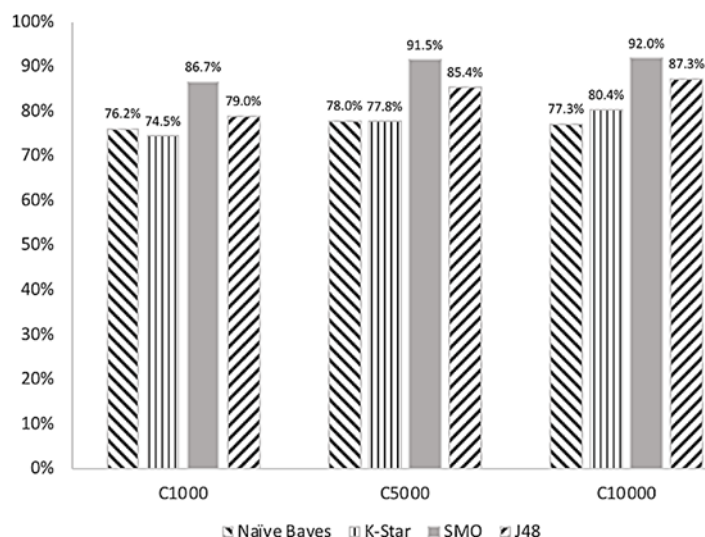


Figura 1 Porcentaje de instancias clasificadas correctamente.

El clasificador K-Star, del tipo Lazy, es el que mayoritariamente presenta el menor rendimiento, principalmente cuando el conjunto de datos es pequeño (1,000 y 5,000), aunque cuando el conjunto de datos es mayor (10,000) el rendimiento alcanzó el 80.4%.

El clasificador de Naïve Bayes exhibe un comportamiento también pobre en comparación con SMO, ya que sus porcentajes de clasificación se encuentran entre el 76% y el 78%.

El clasificador J48, basado en árboles de decisión, es el segundo que mejor se comporta al alcanzar un porcentaje máximo de clasificación del 87.3% cuando el conjunto de datos es de 10,000 muestras. En general, se observa que SMO es el mejor clasificador supervisado, alcanzando un porcentaje cercano al 92%, lo cual se considera muy bueno en el estado del arte. Habría que analizar dicho comportamiento cuando el conjunto de datos es mayor, por ejemplo, duplicando las muestras positivas y negativas. Sin embargo, este análisis será considerado como trabajo a futuro.

En la figura 2 se presenta el porcentaje de instancias clasificadas incorrectamente por cada uno de los clasificadores supervisados (Naïve Bayes, K-Star, SMO y J48) en los tres diferentes corpora evaluados (C1000, C5000 y C10000). Es relevante mencionar que existe una diferencia significativa en la tasa de error obtenida por

el clasificador SMO con respecto a los otros tres clasificadores supervisados (Naïve Bayes, K-Star y J48), la cual llega a ser de hasta 14.6 puntos cuando se usa el corpus C10000.

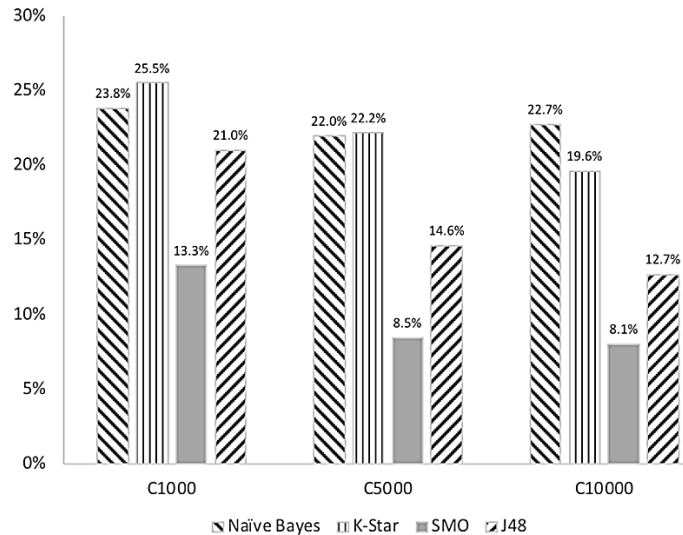


Figura 2 Porcentaje de instancias clasificadas incorrectamente.

Desde esta perspectiva, los resultados son muy buenos dada la cantidad de datos usados. Es evidente que el mejor clasificador ha resultado ser SMO, una implementación de las máquinas de vectores de soporte.

## 5. Conclusiones

En este artículo se presentó un análisis de la polaridad de comentarios de estudiantes universitarios. Se analizaron cuatro diferentes métodos de clasificación supervisada para determinar el que mejor comportamiento exhibe sobre la tarea planteada. Se usaron tres diferentes corpora para determinar, también, el impacto en el tamaño de las muestras usadas para el proceso de entrenamiento del modelo de clasificación.

Dados los resultados obtenidos en los experimentos, se concluye que el clasificador basado en máquinas de vectores de soporte es el que mejor comportamiento tiene sobre la clasificación de la polaridad de comentarios de estudiantes universitarios.

Las principales aportaciones de este trabajo son:

- Corpora balanceado para llevar a cabo experimentos relacionados con el cálculo de la polaridad de comentarios de estudiantes universitarios.
- Análisis de cuatros clasificadores supervisados para la tarea de clasificación de comentarios positivos y negativos.

Es importante destacar que este artículo hace una contribución importante en la generación de recursos de análisis de textos para el español de México, pues es generalizado el conocimiento de que existe una carencia de este tipo de recursos para este idioma.

Como trabajo futuro, se considera importante experimentar con un mayor conjunto de datos y con otros clasificadores tales como campos aleatorios condicionales (CRF), por citar un ejemplo. Así también, y dados los resultados obtenidos, se cree que es posible generar un módulo computacional que permita llevar a cabo el proceso de clasificación de polaridad (positivo/negativo) de comentarios de estudiantes universitarios.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Amigó, E., Carrillo de Albornoz, J., Chugur, I., Corujo, A., Gonzalo, J., Meij, E., de Rijke, M., & Spina, D. Overview of RepLab 2013: Evaluating Online Reputation Monitoring Systems. P. Forner, H. Müller, R. Paredes, P. Rosso, B. Stein (eds.) CLEF. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 8138. 2013, pp 333–352.
- [2] Pang, B., Lee L., & Vaithyanathan, S.: Thumbs up? Sentiment Classification using Machine Learning Techniques. "Proceedings of the ACL-02 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing-Volume 10". Association for Computational Linguistics, 2002, pp 79-86.
- [3] Brooke, J., Tofiloski, M., & Taboada, M.: Cross-Linguistic Sentiment Analysis: From English to Spanish. RANLP. 2009, pp 50-54.
- [4] Carrillo-de-Albornoz, J., Amigó, E., Plaza, L., & Gonzalo, J.: Tweet Stream Summarization for Online Reputation Management. Ferro N. et al. (eds)

- Advances in Information Retrieval. ECIR 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol. 9626. Springer, Cham. 2016, pp 378-389.
- [5] Fernández, A., Nuñez, L., Morere, P., & Santos, A.: Sentiment Analysis and Topic Detection of Spanish Tweets: A comparative Study of NLP Techniques. "Procesamiento del Lenguaje Natural, Revista nº 50", marzo de 2013, pp 45-52.
- [6] Fernández, J., Boldrini, Gómez, E. J. M., & Martínez-Barco, P.: Análisis de sentimientos y minería de opiniones: el corpus EmotiBlog. Procesamiento del Lenguaje Natural, Revista nº 47", septiembre de 2011, pp 179-187.
- [7] Hu, M., & Liu, B.: Mining and summarizing customer reviews. Proceedings of the Tenth ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. KDD '04, ACM, New York, NY, USA, 2004, pp 168-177.
- [8] Manning, C., & Schütze, H.: Foundations of statistical natural language processing. MIT Press, Cambridge, USA, 1999.
- [9] Miller, G.A., Beckwith, R., Fellbaum, C., Gross, D., & Miller, K.: Wordnet: An on-line lexical database. International Journal of Lexicography 3, 1990, pp. 235-244
- [10] Mohammad, S.M., Bravo-Marquez, F., Salameh M., & Kiritchenko, S.: Semeval-2018 Task 1: Affect in Tweets. "Proceedings of the International Workshop on Semantic Evaluation (SemEval-2018)", New Orleans, LA, USA, June 2018.
- [11] Nasukawa, T., & Yi, J.: Sentiment analysis: Capturing favorability using natural language processing. "Proceedings of the 2Nd International Conference on Knowledge Capture". K-CAP '03, ACM, New York, NY, USA, 2003, pp 70-77.
- [12] Pérez-Rosas, V., Banea, C., & Mihalcea, R.: Learning Sentiment Lexicons in Spanish. LREC. 2012, pp 3077-3081.
- [13] Rosenthal, S., Farra, N., Nakov P.: SemEval-2017 Task 4: Sentiment Analysis in Twitter. Proceedings of the 11th International Workshop on Semantic Evaluation. Vancouver, Canada. August 2017.
- [14] Sidorov, G., Miranda-Jiménez, S., Viveros-Jiménez, F., Gelbukh, A., Castro-Sánchez, N., Velásquez, F., Díaz-Rangel, I., Suárez-Guerra, S., Treviño, A., & Gordon, J.: Empirical Study of Machine Learning Based Approach for Opinion Mining in Tweets. Lecture Notes in Artificial Intelligence LNAI, vol 7629. 2012, pp 1-14.

# **MODELO BASADO EN REDES NEURONALES RECURRENTE LSTM PARA LA PREDICCIÓN DE LA SIGUIENTE ACTIVIDAD EN PROCESOS DE NEGOCIO**

## *LSTM RECURRENT NEURAL NETWORK BASED-MODEL FOR THE PREDICTION OF THE NEXT ACTIVITY IN BUSINESS PROCESSES*

***Ulises Manuel Ramírez Alcocer***

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*a2093010066@alumnos.uat.edu.mx*

***Edgar Tello-Leal***

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*etello@uat.edu.mx*

***Ana Bertha Ríos Alvarado***

Universidad Autónoma de Tamaulipas  
*arios@docentes.uat.edu.mx*

### **Resumen**

Las redes neuronales recurrentes de tipo Memoria a Corto y Largo Plazo (LSTM) proporcionan una alta precisión en la predicción del modelado de secuencias en varios dominios de aplicación. En este artículo se introduce el uso de redes LSTM para la predicción de actividades de un proceso de negocio, etapa importante dentro del descubrimiento de procesos de negocio en la minería de procesos. Se propone una metodología para la implementación de la red LSTM en el dominio de minería de procesos. La red neuronal LSTM es entrenada con diferentes registros de eventos para comparar su tasa de exactitud, los registros de eventos presentan diferente cantidad de trazas, número de casos y total de actividades. La tasa de exactitud obtenida en el entrenamiento de la red neuronal es aceptable de acuerdo a la literatura del dominio, así como la validación de la precisión en la predicción de la siguiente actividad.

**Palabras Claves:** LSTM, minería de procesos, red neuronal, registro de eventos.



## **Abstract**

*The Long Short-Term Memory (LSTM) Recurrent Neural Networks provide a high precision in the prediction of the modeling of sequences in several application domains. This article introduces the use of LSTM networks for the prediction of activities in a business process, an important step in the discovery of business processes in process mining. A methodology for the implementation of the LSTM network in the process mining domain is proposed. The LSTM neural network is trained with different event logs to compare its accuracy rate, the event logs contain a different number of traces, number of cases and total activities. The accuracy rate obtained in the training of the neural network is acceptable according to the literature of the domain, as well as the validation precision in the prediction of the next activity.*

**Keywords:** Event log, LSTM, neural network, process mining.

## **1. Introducción**

Actualmente, en una economía basada en el conocimiento, las organizaciones públicas o privadas, requieren realizar una gestión de activos de conocimiento apropiada para mantener una ventaja competitiva en los mercados globales o en los servicios gubernamentales. En este ámbito la gestión de procesos de negocio ha recibido considerable atención recientemente por las comunidades de investigación de ciencias de la computación y administración de negocios.

Las tecnologías de información en general y los sistemas de información en particular desempeñan un rol importante en la gestión de procesos de negocio, debido a que una gran cantidad de actividades que las organizaciones realizan son soportadas por los sistemas de información. Varios tipos de actividades contenidas en los procesos de negocio pueden ser ejecutadas automáticamente por los sistemas de información, sin la participación de un humano. Un *proceso de negocio* consiste de un conjunto de actividades que son realizadas en forma coordinada en una organización en un ambiente técnico, y estos procesos de negocio tienen correlacionada al menos una meta de negocio [Weske, 2012]. El lenguaje estándar para modelar procesos de negocio es la Notación para el Modelado de Procesos

de Negocio (BPMN, del inglés *Business Process Model and Notation*) [Object, 2011].

Las técnicas de minería de procesos son capaces de extraer conocimiento a partir de los registros de eventos, comúnmente disponibles en los sistemas de información. Estas técnicas proporcionan nuevos medios para *descubrir, monitorear, y mejorar* los procesos de negocio en una variedad de dominios de aplicación. Existen dos factores principales para el creciente interés en la minería de procesos. Por un lado, cada vez más eventos se registran, proporcionando información detallada sobre la historia de los procesos de negocio. Por otro lado, existe una necesidad de mejorar y dar soporte a los procesos de negocio en entornos competitivos y rápidamente cambiantes.

En la minería de procesos se asume que es posible registrar eventos secuencialmente, dado que cada evento tiene referencia a una *actividad* y se relaciona a un caso en particular (una instancia del proceso) [Aalst, 2012]. Entonces, los datos de entrada en la minería de procesos es un registro de eventos. Un *registro de eventos* es un archivo estructurado jerárquicamente con datos sobre las ejecuciones de procesos de negocio [Baier, 2014]. Este archivo contiene datos sobre varias ejecuciones del mismo proceso de negocio. Un *evento* es la parte atómica de ejecución de un proceso específico y puede contener una gran cantidad de atributos. Los *datos de eventos*, generados por los sistemas de información, normalmente se encuentran como actualizaciones de un estado (por ejemplo, del estado “factura enviada” cambia al estado “factura pagada”), o también como registros de actividad (por ejemplo, “correo electrónico enviado al cliente”). Una *traza* es un conjunto de eventos que pertenecen a la misma ejecución de un proceso de negocio. Por lo tanto, los registros de eventos pueden contener información adicional de los eventos, tales como el usuario que ejecuta la actividad o el dispositivo que inicia la actividad, la hora en que inició el evento, la duración del evento, entre otras.

Las principales tareas de minería de procesos son descubrimiento, conformidad y mejoramiento de procesos. El *descubrimiento de procesos* consiste en utilizar un registro de eventos como entrada y producir un modelo de procesos de negocio

sin usar información a-priori [Aalst, 2016]. El modelo descubierto normalmente es un modelo de proceso de negocio que es representado usando una notación gráfica como el lenguaje BPMN [Object, 2011], redes de Petri [Jensen, 2009], [Tello-Leal, 2014], cadenas de procesos basadas en eventos (EPC, del inglés *Event-driven Process Chains*) [Gottschalk, 2008], o diagramas de actividades de UML. La *conformidad de procesos* consiste en comparar un modelo de proceso de negocio con el registro de eventos generado por la ejecución de mismo modelo de proceso [Aalst, 2016]. La verificación de conformidad puede ser utilizada para evaluar si la información almacenada en el registro de eventos es equivalente al modelo y viceversa. El *mejoramiento de procesos* consiste en extender o mejorar un modelo de proceso existente usando la información almacenada del proceso actual en el registro de eventos. La arquitectura de red neuronal recurrente (RNN) se ha convertido en un modelo de red neuronal implementado en diferentes dominios, debido a su capacidad natural para procesar entradas secuenciales y conocer sus dependencias a largo plazo [Wei, 2018]. A diferencia de la red neuronal feed-forward, las neuronas de RNN están conectadas entre sí en la misma capa oculta y se aplica una función de entrenamiento a los estados ocultos repetidamente [Wei, 2018]. En este sentido, la red neuronal de Memoria a Corto y Largo Plazo (LSTM, del inglés *Long Short-Term Memory*) es una extensión de la RNN, la cual ha logrado excelente rendimiento en diversas tareas, especialmente en problemas secuenciales [YiFei, 2018], [Cortez, 2018], [Liu, 2018].

Un requerimiento importante en la gestión de procesos de negocio es tener sistemas de información con capacidad para predecir el comportamiento futuro de un proceso de negocio [Evermann, 2017]. Es decir, métodos predictivos de monitoreo de procesos negocio que explotan los registros de eventos para hacer predicciones sobre casos de ejecución de los mismos [Tax, 2017]. Por lo tanto, la implementación de redes neuronales LSTM para el descubrimiento de eventos o actividades de un proceso de negocio mediante un análisis predictivo, se puede considerar una estrategia importante como una técnica de la minería de procesos. En el presente artículo se propone un enfoque para el descubrimiento de procesos de negocio a partir de trazas contenidas en un registro de eventos. El

descubrimiento se realiza mediante una técnica de modelado predictivo para procesos de negocio. El modelo predictivo se basa en una red neuronal recurrente LSTM que es entrenada con un registro de eventos, habilitando la predicción de la actividad siguiente derivada de una actividad de entrada o un conjunto de actividades. La red neuronal LSTM presenta una tasa de exactitud altamente aceptable, lo cual permite predecir una actividad con un porcentaje de precisión máximo. La red neuronal LSTM fue entrenada con diferentes registros de eventos, comportándose en forma similar para todos los casos.

## 2. Métodos

### Registro de eventos

El componente importante en los enfoques de la minería de procesos es la utilización de registros de eventos para descubrir modelos de procesos de negocio. El formato estándar para contener un registro de evento es un documento XES (del inglés, *eXtensible Event Stream*) [Aalst, 2016]. Un documento XES (basado en XML) contiene un registro que consta de cualquier cantidad de trazas. Cada traza describe una lista secuencial de eventos correspondientes a un caso particular. El registro, sus trazas y sus eventos pueden tener cualquier cantidad de atributos. Los atributos pueden estar anidados, limitado a cinco tipos: cadena, *fecha*, entero, *flotante* y *booleano*. En la figura 1 se muestra un extracto de un registro de eventos basado en el estándar XES.

```
</trace>
<trace>
  <string key="concept:name" value="Case1.37"/>
  <event>
    <string key="org:resource" value="UNDEFINED"/>
    <date key="time:timestamp" value="2010-10-27T22:31:19.526+02:00"/>
    <string key="concept:name" value="a"/>
    <string key="lifecycle:transition" value="complete"/>
  </event>
  <event>
    <string key="org:resource" value="UNDEFINED"/>
    <date key="time:timestamp" value="2010-10-27T22:32:19.526+02:00"/>
    <string key="concept:name" value="c"/>
    <string key="lifecycle:transition" value="complete"/>
  </event>
  <event>
    <string key="org:resource" value="UNDEFINED"/>
    <date key="time:timestamp" value="2010-10-27T22:33:19.526+02:00"/>
    <string key="concept:name" value="d"/>
    <string key="lifecycle:transition" value="complete"/>
  </event>
</trace>
```

Figura 1 Extracto de registro de eventos.

## Metodología

La metodología que se propone utilizar en la implementación de una red neuronal LSTM para predecir la actividad siguiente a partir de un registro de eventos, generados de la ejecución de procesos de negocio se conforma de tres fases:

- Pre-procesamiento del registro de eventos.
- Categorización.
- Modelo de predicción basado en LSTM, tal como se muestra en la figura 2.

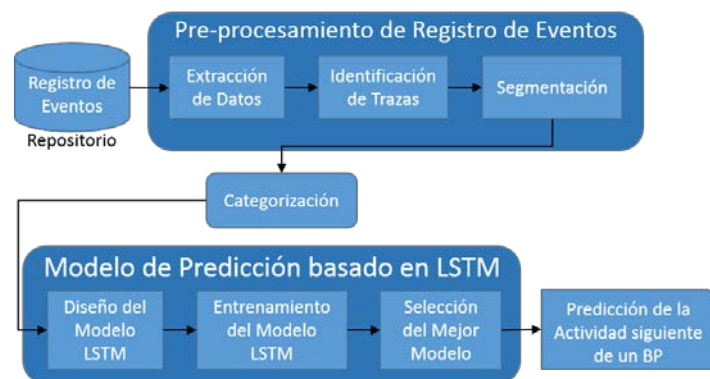


Figura 2 Esquema de la metodología propuesta.

La fase de pre-procesamiento del registro de eventos se compone de las siguientes etapas:

- **Extracción de datos.** Se realiza un análisis detallado de los registros de eventos en el formato .xes, el cual permite la identificación de los diferentes atributos que contiene el registro de eventos, permitiendo seleccionar los atributos requeridos para una predicción, en este caso se utiliza el atributo “actividad”.
- **Identificación de trazas.** Consiste en identificar y obtener las trazas, con sus respectivos eventos. A continuación, se agregan en un archivo de texto, manteniendo su orden de aparición.
- **Segmentación.** Al archivo de texto generado en la etapa anterior se le aplica una tarea de segmentación, que consiste en crear una lista de todos los eventos de una traza, utilizando un criterio de separación entre cada evento.

A continuación, cada evento es convertido en un número entero único, posteriormente, las trazas son convertidas en una secuencia de números enteros, posibilitando generar una lista de secuencia de “números enteros” conformada de *actividades de entrada* (X) y *actividades de salida* (Y). Entonces, la lista de secuencia se divide en dos listas, la primera contiene la secuencia de *actividades de entrada* (X). La segunda lista almacena los enteros correspondientes a la *actividad de salida* (Y) de cada secuencia. Finalmente, la lista de secuencia de *actividades de entrada* es transformada en una matriz de dos dimensiones (número de secuencias, máxima longitud de secuencias).

La fase intermedia de **categorización** consiste en un proceso para categorizar la secuencia de números enteros correspondiente a las *actividades de salida* (Y) en una representación de tipo “*one hot encoding*”, especificando que el número de clases será igual al tamaño del vocabulario. La fase de modelo de predicción basado en LSTM se compone de las siguientes etapas:

- **Diseño de la red.** se genera el diseño de la red LSTM, por capas, primero se genera la capa de entrada (*embedding*), luego la capa oculta (unidades LSTM), finalmente la capa de salida, en cada una de estas capas, se definen los parámetros necesarios.
- **Entrenamiento de la red.** El entrenamiento de la red LSTM se realiza utilizando como datos entrenamiento la secuencia de números representadas por las actividades contenidas en la matriz (X) y en la representación “one hot” (Y).
- **Selección del modelo.** Los resultados del entrenamiento permitirán elegir el modelo de la red LSTM como modelo final a implementar. Un entrenamiento con un grado de exactitud alto se deberá seleccionar como el modelo para realizar las predicciones. En caso contrario, se recomienda modificar el diseño de la red, ajustando los parámetros requeridos y ejecutar nuevamente el entrenamiento de la red.
- **Predicción.** Es la salida generada por la red neuronal LSTM, la cual mediante una fase de entrenamiento permite predecir la actividad siguiente

en un proceso de negocio, a partir de una actividad de entrada o de una secuencia de actividades de entrada, lo cual se explica en los siguientes apartados del documento.

### **Bases de la Implementación**

El enfoque propuesto se basa en la ejecución de una red neuronal recurrente LSTM, que es considerada como una red de estructura especial que consisten en bloques de memoria y celdas de memoria, junto con las unidades de compuerta que las contienen [Sak, 2015], es decir, una unidad LSTM se compone de una celda y tres compuertas (entrada, salida y olvido). Mediante esta estructura especial una red LSTM puede seleccionar qué información se olvida o se recuerda. Las unidades de compuerta de entrada multiplicativas se usan para evitar los efectos negativos que las entradas no relacionadas pueden crear. La compuerta de entrada controla el flujo de entrada a la celda de memoria, y la compuerta de salida controla la secuencia de salida de la celda de memoria a otros bloques LSTM.

La compuerta de olvido en la estructura del bloque de memoria está controlada por una red neuronal simple de una capa. En un momento  $t$ , los componentes de la unidad LSTM se actualizan mediante ecuación 1 [Hochreiter, 1997], [Cortez, 2018].

$$f_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_f) \quad (1)$$

Donde  $x_t$  es la secuencia de entrada,  $h_{t-1}$  es la salida de bloque anterior,  $c_{t-1}$  es la memoria de bloque LSTM anterior, y  $b_f$  es el vector de polarización.  $W$  representa vectores de peso separados para cada entrada y  $\sigma$  es la función sigmoidea logística. La función de activación sigmoidea, que es la salida de la compuerta de olvido, se aplica al bloque de memoria anterior mediante la multiplicación por elementos. Por lo tanto, se determina el grado en que el bloque de memoria previo será efectivo en el LSTM actual. Si el vector de salida de activación contiene valores cercanos a cero, se olvidará la memoria anterior.

La otra compuerta, la compuerta de entrada, es una sección donde la nueva memoria es creada por una red neuronal simple con la función de activación  $\tanh$

y el bloque de memoria anterior. Estas operaciones se calculan mediante las ecuaciones 2 y 3.

$$i_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_i) \quad (2)$$

$$C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tanh(W[x_t, h_{t-1}, C_{t-1}] + b_c) \quad (3)$$

Finalmente, la compuerta de salida es la sección en donde se genera las probabilidades del bloque LSTM actual [Cortez, 2018]. Las salidas se calculan mediante las ecuaciones 4 y 5.

$$o_t = \sigma(W[x_t, h_{t-1}, C_t] + b_o) \quad (4)$$

$$h_t = \tanh(C_t) \cdot o_t \quad (5)$$

### 3. Resultados

En la implementación de la red neuronal LSTM se utilizó una librería de Python denominada Keras [Chollet, 2015], la cual permite construir modelos de redes de aprendizaje profundo (*deep learning*). Los parámetros de implementación de la red LSTM se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros de configuración de la red neuronal LSTM.

Parámetro	Valor
epochs	500
batch_size	20
optimizer	Adam
loss	categorical_crossentropy
LSTM_units	50

En la figura 3 se presenta un extracto del registro de eventos utilizado para entrenar la red neuronal LSTM, el cual corresponde al Log\_5 de la tabla 2.

```

1 a b e f
2 a b e c d b f
3 a b c e d b f
4 a b e c d b f
5 a e b c d b f
6 a b c d e b f
7 a b c d e b f
8 a b e f
9 a b e c d b f
10 a e b c d b f
11 a e b c d b f
12 a b e f
    
```

Figura 3 Extracto de un registro de evento.



Tabla 2 Valores de la red neuronal LSTM.

Registro	Trazas	Número de Casos	Total de Actividades	Actividades Máximas por Caso	Tasa de Exactitud	Validación de la Precisión
Log_1	35	3	5	4	0.8889	0.8990
Log_2	13	6	6	12	0.8202	0.9787
Log_3	4	3	7	16	0.8919	0.9000
Log_4	147	4	5	3	0.7175	0.7090
Log_5	14	5	6	7	0.7889	0.8000
Log_6	11	4	6	4	0.9048	0.8910
Log_7	8	4	3	6	0.7600	0.7500
Log_8	6	3	4	7	0.7917	0.7620
Log_9	200	4	4	3	0.9916	0.9575
Log_10	1391	21	8	17	0.8055	0.7000

En la tabla 2 se presenta los resultados obtenidos por la red neuronal LSTM, representados mediante la tasa de exactitud y el porcentaje de predicción. La columna “Registro” representa el documento XES (registro de evento) utilizada para entrenar la red LSTM. La columna “Trazas” es el número de trazas contenidas en el registro. La columna “Número de Casos” representa el comportamiento que se puede identificar del modelo de proceso de negocio, de acuerdo a las trazas contenidas en el registro de eventos. En la columna “Total de Actividades” representa el número de actividades diferentes contenidas en el registro de eventos. La columna “Validación de la Precisión” representa la capacidad de la red para predecir la siguiente actividad.

Las pruebas realizadas a la red LSTM entrenada permiten comprobar que tienen capacidad para predecir la siguiente *actividad* de un modelo de proceso de negocio. La red LSTM acepta como dato de entrada de *una actividad* hasta *cuatro actividades*, prediciendo en todos los casos la siguiente *actividad* de la secuencia recibida en la entrada. El aumento en la precisión que se muestra en la tabla 2 se puede justificar debido a que el conjunto de datos consiste en secuencias más largas de palabras (eventos) idénticas, lo que hace mucho más fácil la predicción de la siguiente actividad, este tipo de resultados se han presentado en otros trabajos relacionados a la predicción del siguiente evento o actividad en procesos de negocio utilizando redes neuronales LSTM [Evermann, 2017].

En la tabla 3 se presenta un extracto de los resultados obtenidos en la predicción de la red neuronal utilizando el Log\_5 presentado en la tabla 2, en la columna

“Actividad Esperada” se muestran las actividades con mayor probabilidad de respuesta por la red neuronal, en base a los pesos de cada actividad.

Tabla 3 Extracto de la predicción generada por la red neuronal LSTM.

No.	Actividad de Entrada	Actividad Esperada	Actividad de Salida
1	c	d   e	D
2	b	c   e	C
3	a	b   e	B
4	a b	e   c	E
5	a e	b	B
6	e b	c	C
7	c d	b   e	B
8	b c	d   e	D
9	a b e	f   c	F
10	c d e	b	B

#### 4. Discusión

En el presente trabajo se ha identificado un área de oportunidad en la cual se pueden implementar redes neuronales recurrentes de tipo LSTM. También, presenta una metodología para la implementación de una red neuronal recurrente para el descubrimiento de modelos de procesos de negocio, en específico predecir la siguiente actividad, como técnica de la minería de procesos. La metodología permite identificar las fases requeridas para predecir la actividad o evento siguiente, mediante la implementación de la red neuronal LSTM.

Cabe mencionar que las trazas en un registro de eventos están en un orden particular, pero este es un orden arbitrario. Entonces, debido a que las celdas LSTM mantienen el estado, el orden en que se usan las trazas para entrenar la red puede tener un efecto en el resultado. Además, la selección del conjunto de trazas de un registro de eventos, datos de entrenamiento, tiene una influencia, y los resultados obtenidos con una muestra particular pueden no generalizarse a otros casos (registros de eventos), tal como se presenta en tasa de exactitud (tabla 2).

El análisis predictivo implementado permite obtener información útil para descubrir un modelo de proceso de negocio a partir de registros de evento. Ciertamente, es necesario explorar con otros registros de eventos con mayor cantidad de trazas, así como considerar incluir dos o más clases para predecir la siguiente actividad o evento.

## **5. Conclusiones**

En este artículo se presentó el diseño de un enfoque de método predictivo para datos contenidos en los registros de eventos de procesos de negocio utilizando un enfoque de red neuronal recurrente LSTM. La aplicación de esta técnica es novedosa en el campo de la minería de procesos de negocio. Al usar registros de eventos para el entrenamiento de la red neuronal LSTM con datos sintéticos y del mundo real, se demuestra que el método predictivo puede ser efectivo, presentando una tasa de exactitud aceptable, en todos los casos de estudio.

En nuestro punto de vista, la variación en la tasa de exactitud que se presenta dependiendo del registro de eventos utilizado para el entrenamiento de la red neuronal recurrente LSTM, se debe a la cantidad de casos que contiene el registro de eventos, así como la cantidad de trazas contenidas en el registro, lo cual puede influir en la predicción de la actividad siguiente, realizada por la red neuronal. Un trabajo futuro por atender es ampliar la matriz de vectores de características con casos adicionales y atributos contenidos en el registro de eventos adicionales, por ejemplo, marcas de tiempo y recursos.

Este trabajo ha sido financiado por la beca 26328 del proyecto de Investigación de Ciencia Básica SEP-CONACYT CB\_2015/256922.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Baier, T., Mendling, J., Weske, M. Bridging abstraction layers in process mining. *Information Systems*, 46(6), 123-139, 2014.
- [2] Chollet, F. Keras. <https://github.com/fchollet/keras>, 2015.
- [3] Cortez, B., Carrera, B., Kim, Y. J., Jung, J. Y. An architecture for emergency event prediction using LSTM recurrent neural networks. *Expert Systems with Applications*, 97, 315-324, 2018.
- [4] Evermann, J., Rehse, J. R., Fettke, P. Predicting process behaviour using deep learning. *Decision Support Systems*, 100, 129-140, 2017.
- [5] Gottschalk, F., van der Aalst, W., Jansen-Vullers, M. Merging event-driven process chains. In Meersman, R., Tari, Z., eds. *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2008*. Springer Berlin Heidelberg, 418-426, 2008.

- [6] Hochreiter, S., Schmidhuber, J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780, 1997.
- [7] Liu, F., Chen, Z., Wang, J. Video image target monitoring based on RNN-LSTM. *Multimedia Tools and Applications*, 1-18, 2018.
- [8] Jensen, K., Kristensen, L.M. *Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany. 2009.
- [9] Object Management Group. *Business process model and notation version 2.0. Specification formal/2011-01-03*, Object Management Group, 2011.
- [10] Sak, H., Senior, A., Beaufays, F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling. In *Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 2014.
- [11] Tax, N., Verenich, I., La Rosa, M., Dumas, M. Predictive Business Process Monitoring with LSTM Neural Networks. In *Advanced Information Systems Engineering*, Dubois, E., Pohl, K., eds., Springer, 477-492, 2017.
- [12] Tello-Leal, E., Chiotti, O., Villarreal, P.D. Software agent architecture for managing inter-organizational collaborations. *Journal of Applied Research and Technology*, 12(3), 513-526, 2014.
- [13] van der Aalst, W., Adriansyah, A., de Medeiros, A.K.A., et al. Process mining manifesto. In Daniel, F., Barkaoui, K., Dustdar, S., eds. *Business Process Management Workshops*. Springer Berlin Heidelberg, 169-194, 2012.
- [14] van der Aalst, W. *Process Mining: Data Science in Action*, 2nd edn. Springer. New York, USA. 2016.
- [15] Wei, X., Wen Z., Bo L., Min C., Lijun C., Lei H. Novel architecture for long short-term memory used in question classification. *Neurocomputing*, 299, 20-31, 2018.
- [16] Weske, M. *Business Process Management: Concepts, Languages, Architectures*, 2nd edn. Springer, Berlin, Germany. 2012.
- [17] YiFei, L., Han C. Prediction for Tourism Flow based on LSTM Neural Network. *Procedia Computer Science*, 129, 277-283, 2018.

# **CONTROLADOR DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN BUS DE CD DE UN CONVERTIDOR BACK-TO-BACK POR EL LADO DE LA RED PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA**

*VOLTAGE AND CURRENT ON THE GRID SIDE FOR THE DC BUS OF A BACK TO BACK CONVERTER FOR A WIND GENERATION SYSTEM*

**Francisco Emilio Rodarte Gutiérrez**

Instituto Politécnico Nacional  
*frodg01@hotmail.com*

**Jaime José Rodríguez Rivas**

Instituto Politécnico Nacional  
*jjrodriguezr@ipn.mx*

**Oscar Carranza Castillo**

Instituto Politécnico Nacional  
*ocarranzac@ipn.mx*

**Rubén Ortega González**

Instituto Politécnico Nacional  
*rortegag@ipn.mx*

## **Resumen**

El convertidor del tipo back-to-back se utiliza para transferir energía en ambas direcciones de acuerdo a lo requerido por un esquema de generación eólica basado en un generador de inducción doblemente alimentado. En su operación, la mitad de este convertidor que corresponde al inversor del lado de la red se encarga de controlar la tensión en el bus de CD. En este trabajo se presenta una estructura de control para esta sección del convertidor que controla la corriente inyectada o demandada a la red y la tensión en el Bus de CD. La estructura de control propuesta permite que se opere en modo rectificador activo y como inversor con inyección de potencia a la red, según lo requieran los lazos de control para mantener la tensión constante del Bus de CD. Para la verificación de esta propuesta se presentan resultados de simulación.

**Palabras Claves:** Control vectorial, convertidor back-to-back, inversor, rectificador activo.

## **Abstract**

*The back to back converter is used to transfer energy in both directions from one section to another according to the requirements of a wind energy generation system, based in a Doubly Fed Induction Generator, for its operation one half of the converter, which is the inverter on the grid side handles the control of the voltage in the DC link, which is also the part connected to the grid. The proposed control structure allows the operation as an active rectifier or as an inverter injecting power to the grid, according to the command of the external voltage loop. The proposed structure was verified with simulation results were the transition from an active rectifier to inverter was tested by changing the direction of the current at the DC link. Simulation results were presented in order to verify this proposal.*

**Keywords:** Active rectifier, back-to-back converter, inverter, vector control.

## **1. Introducción**

Actualmente algunos esquemas de generación eólica se caracterizan por la incorporación de convertidores electrónicos de potencia con la finalidad de obtener características mejoradas de operación de los sistemas de generación eólica, maximizar la energía generada, y obtener una mejor regulación de las tensiones y corrientes del sistema. Además, el uso de convertidores del tipo CA-CA (cicloconvertidores, convertidores matriciales y back-to-back) ha permitido, a los generadores del tipo síncrono tales como el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP) operar a velocidades variables, esto es utilizando convertidores que proporcionen tensiones de frecuencia variable a la máquina. También es posible incrementar el rango de velocidad en los generadores de inducción del tipo jaula de ardilla también con el uso de este tipo de convertidores [Jianfeng, 2017], los cuales de lo contrario necesitarían para operar como generador un deslizamiento negativo y un límite de velocidad que alcanza como máximo un 10% sobre la velocidad síncrona. Para el caso del Generador de Inducción de Doble

Alimentación (GIDA), el cual, si se alimenta en su rotor por una fuente trifásica de frecuencia y amplitud variables, este tiene la capacidad de operar en un rango de velocidades entre  $\pm 30\%$  de la velocidad síncrona, mientras el estator se encuentra conectado a la red eléctrica de tensión y frecuencia fijas, el cual se ha utilizado en aplicaciones de generación eólica en velocidad variable [Fateh, 2015].

En el sistema de generación eólica basado en un GIDA se propone utilizar un convertidor back-to-back entre la alimentación del rotor y la red eléctrica, con un esquema de control vectorial, utilizando un sistema cuyo esquema se muestra en la figura 1. Esta configuración se propone con la finalidad de inyectar potencias reactivas en el rotor para realizar la excitación magnética de la máquina, y de esta manera conseguir una operación con reactivos igual a cero y factor de potencia unitario en las terminales del estator. Además, para los modos de operación en velocidades subsíncronas o supersíncronas se precisa la inyección o la extracción de potencia activa que permita a la máquina entregar las potencias que le son requeridas en su estator. De esta manera se considera que el convertidor a utilizar en esta aplicación debe de ser capaz de generar componentes reactivos, así como, transferir potencia de manera bidireccional con el empleo de un esquema de control vectorial.

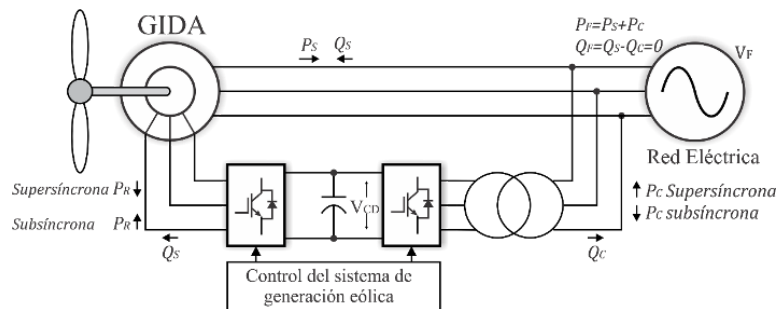


Figura 1 Diagrama a bloques del sistema de generación eólica utilizando un generador de inducción de doble alimentación.

Como se puede apreciar en la figura 1, el convertidor Back-to-Back se conecta entre los devanados del rotor y la red eléctrica, en este caso la inyección o la extracción de potencia al rotor es determinada por la estructura de control vectorial en el convertidor del lado de la máquina, el cual también puede implementar algoritmos

de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) para el sistema eólico, por lo que este debe demandar o transferir potencia al Bus de CD. En este esquema, el convertidor del lado de la red realiza el control de la tensión en el enlace de CD, el cual depende de la potencia que pueda transferir o extraer de la red eléctrica. En distintos trabajos [Isen, 2012][Xu, 2016] se muestra que la parte del convertidor que se encuentra conectada en el lado de la red puede operar como inversor y como rectificador, para lo cual las estructuras de control utilizadas para ambos casos son idénticas, requiriendo únicamente realizar cambios en las referencias de corriente cuando este necesite cambiar de modo, sin embargo no se suele presentar los dos modos de operación en un mismo trabajo, por ello la motivación de este trabajo es presentar a detalle los dos modos de operación en un solo convertidor, además de mostrar la transición entre los dos modos durante operación continua.

## **2. Métodos**

Las características del convertidor son determinadas por las características del GIDA empleado en el sistema de generación eólica, estas se muestran en la tabla 1, en donde las potencias requeridas que se deben de inyectar en el rotor para operar con potencia de estator nominal a velocidad subsíncrona mínima o a velocidad supersíncrona máxima, se calculan a partir de las características del GIDA, utilizando el análisis mostrado en [Abad 2011], sabiendo que este tipo de sistemas suelen operar en rangos de velocidades alrededor de un  $\pm 30\%$  de la velocidad síncrona.

Tabla 1 Características de generador de inducción doble alimentación SPR 132 L6 HW.

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Potencia Nominal	5.5 kW
Velocidad síncrona	1200 rev/s
No. De Polos	6
Tensión de línea en el estator	230 V
Corriente Nominal del estator	21.7 A
Tensión de línea en el rotor	180 V
Corriente máxima del rotor	19 A
Factor de potencia	0.79



## Dimensionamiento del sistema de generación eólica

En el caso de la generación de energía eléctrica a velocidades inferiores a la síncrona es necesario inyectar potencia en las terminales del rotor de la máquina, por lo que, para la operación del GIDA con una potencia de 5.5 kW en las terminales del estator y de acuerdo al análisis en [Bose, 2002] [Abad, 2015], la potencia real que se debe de inyectar en el rotor para un deslizamiento máximo de  $S = 0.3$  se obtiene con la relación aproximada de la ecuación 1.

$$P_r \cong sP_s = (0.3)(5.5kW) = 1.65 kW \quad (1)$$

La potencia reactiva correspondiente a la maquina se obtiene con el factor de potencia de la máquina y el triángulo de potencias mostrado en ecuaciones 2 y 3.

$$\text{sen } \varphi = \sqrt{1 - F.P^2} = \sqrt{1 - (0.79)^2} = 0.61 \quad (2)$$

$$Q_T = P_s \frac{\text{sen } \varphi}{\text{cos } \varphi} = 5.5kW \left( \frac{0.61}{0.79} \right) = 4.26 kVAR \quad (3)$$

Considerado que se puede alimentar al rotor de la maquina con la potencia reactiva que requiere la máquina, ya sea completamente o en parte, ésta se determina tomando en cuenta la corriente nominal de rotor para encontrar la potencia reactiva que es posible inyectar en las terminales del rotor, para ello primero se calcula la tensión máxima del rotor  $V'_{rll}$  considerando el deslizamiento máximo  $s$  y su relación de transformación  $u$  como se muestra en la ecuación 4.

$$V'_{rll} = s \frac{V_r}{u} = 0.3(180) = 54 V \quad (4)$$

Partiendo de esta tensión máxima obtenida, la corriente nominal en el rotor se calcula entonces con la potencia aparente haciendo  $S = \sqrt{3} V'_{rll} I_r = \sqrt{3}(54)(19) = 1.78KVA$  de los cuales se necesitan 1650 W de potencia real, por lo que la potencia reactiva que se puede obtener se encuentra utilizando la ecuación 5.

$$Q_r = \sqrt{1778^2 - 1650^2} = 659.7 VAR \quad (5)$$

Por tanto, se tienen disponibles hasta 659.7 VAR que se pueden inyectar a través del rotor, quiere decir que la corriente nominal del rotor es insuficiente para realizar

la inyección de toda la potencia reactiva que necesita la máquina a través del rotor, y que es necesaria para obtener en estator de maquina componentes reactivos cero. Por lo tanto, se considera utilizar el convertidor del lado de la red para realizar la compensación de la potencia reactiva requerida por el sistema de generación eólica. Dado que los reactivos que deben de ser compensados por el convertidor son  $4.268 - 0.6597 = 3.608 \text{ kVAR}$ , se toma en cuenta que convertidor del lado de la red utilizado debe de tener una capacidad de  $S_c = \sqrt{(3.608)^2 + (1.65)^2} = 3.96 \text{ kVA}$ .

Para que el convertidor utilizado se desempeñe con la potencia  $S_c$  que se necesita y tomando en cuenta que el convertidor está basado en el módulo de IGBTs FNA25060, el cual para frecuencias de conmutación de 10 kHz tiene una corriente segura de operación máxima de 28 A, se debe de calcular la tensión mínima utilizando la ecuación 6 con estos dos datos, la cual debe de ser de al menos:

$$V_{CLL} = \frac{S_c}{\sqrt{3} I_c} = \frac{3.96 \text{ kVA}}{\sqrt{3}(28A)} = 82 V_{RMS} \quad (6)$$

Y la tensión mínima en el bus de DC se determina utilizando la ecuación 7.

$$V_{DCmin} = \sqrt{2}(82) = 115 V \quad (7)$$

Considerando hasta un 20% más en la tensión del Bus de CD para asegurar que el convertidor no opere por debajo de la tensión mínima de un rectificador activo se propone un valor de  $V_{CD} = 140 V$  en la tensión del Bus de CD. Tomando en cuenta este valor, se debe de utilizar un transformador entre la red y el convertidor, para un valor de tensión de fase de  $82 V_{RMS}$ . Por lo que el transformador debe tener una relación de transformación de  $u = 82/230 = 0.35$ , y se pueda acoplar el convertidor a la red eléctrica trifásica.

### **Diseño del convertidor electrónico del lado de la red**

Debido a que la corriente nominal del rotor es insuficiente para realizar inyección de toda la potencia reactiva que la máquina requiere para su operación a través del rotor, se plantea utilizar convertidor del lado de la red para realizar la compensación de la potencia reactiva que la máquina toma de la red a través del estator.

Para el dimensionado de los componentes del convertidor del lado de la red se utilizan los parámetros obtenidos anteriormente. Primero para el cálculo del inductor y tomando en cuenta que los valores de la tensión son pequeños se considera una caída de tensión en el inductor  $V_L$  del 15% de la tensión de entrada considerando que se debe compensar por la caída de tensión producida por pérdidas en los IGBT del convertidor y por la resistencia del cobre en los devanados de los inductores, con este criterio se obtiene un inductor de 1.2 mH. Todos los parámetros del convertidor se muestran en la tabla 2, incluida la frecuencia de conmutación que fue seleccionada considerando diversos factores como la velocidad de ejecución de los lazos de control en el microcontrolador, la frecuencia máxima permitida por el módulo de IGBTs utilizados, y evitar la emisión de sonido audible.

Tabla 2 Características del convertidor utilizado.

Tensión de línea RMS	81.66 V
Potencia Nominal	$\pm 3.96$ kVA
Tensión de bus de referencia CD	140 V
Corriente nominal RMS	28 <sup>a</sup>
Capacitor en el Bus de CD	2.7 mF
Inductor L	1.2 mH
Resistencia del Inductor $r_L$	40 m $\Omega$

### Modelo del convertidor del lado de la red

El convertidor back-to-back tiene dos convertidores trifásicos de seis interruptores, conectados en el bus de CD, debido a que el análisis de este artículo se centra en el convertidor del lado de la red, en la figura 2 solo se muestra dicho convertidor, el cual está conectado a la red por medio de un filtro conformado por tres inductores. Por simplicidad en este análisis, se omite el transformador trifásico requerido para convertir las tensiones de la red, sin embargo, este se considera como parte de la componente inductiva ( $L$ ) y sus pérdidas asociadas al inductor ( $r_L$ ). El convertidor del lado de la red trabaja basado en la generación de tensiones de corriente alterna para obtener un fasor de corriente alineado con el fasor de tensión de la red, para el análisis presentado se consideraron las componentes reactivas de la corriente en cero, sin embargo, es posible utilizar el convertidor para inyectar o demandar potencias reactivas a la red eléctrica si así lo requiere la aplicación.

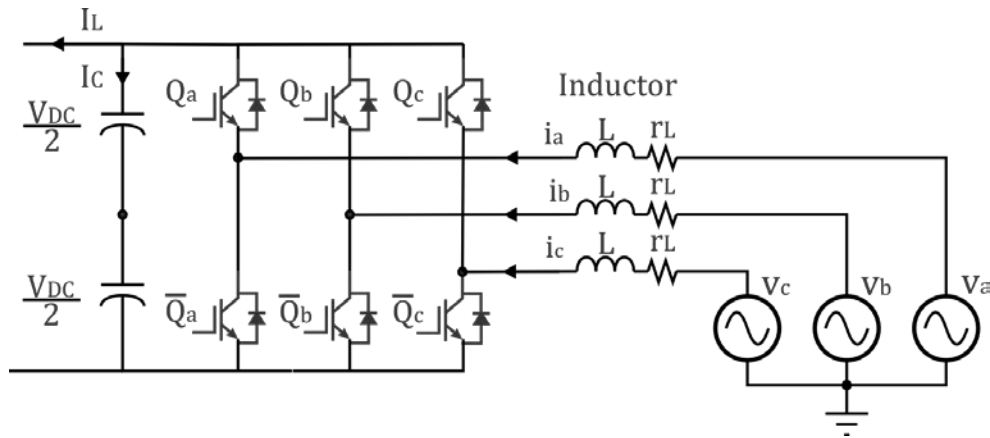


Figura 2 Diagrama del convertidor del lado de la red.

En el modo de operación como rectificador activo el convertidor se comporta como un convertidor tipo Boost, ya que proporciona una tensión en el bus de CD mayor que el valor de la amplitud de las tensiones de fase controlando la componente real de la corriente de entrada al convertidor. Adicionalmente para la operación como inversor, este debe de inyectar potencia a la red eléctrica, pero en este caso y debido a que el valor de la tensión trifásica está establecido por la red, para este caso el convertidor inyecta corriente a la red para mantener la tensión en el enlace de CD, que aumenta cuando el convertidor en el lado de la máquina entrega potencia al enlace de CD. Tomando en cuenta que el convertidor se comporta como una fuente de tensión que se conecta a la red eléctrica, se requiere de un filtro con una impedancia conocida para que al generar las señales de la tensión de salida a través de la modulación PWM, ocurra una caída de tensión en la impedancia y así obtener la corriente que vaya del convertidor a la red o viceversa.

Utilizando un modelo análogo monofásico del inversor se obtiene del diagrama de la figura 3, la forma fasorial de la ecuación 8, la cual se utiliza para determinar el fasor de la tensión del inversor que permite encontrar la corriente deseada.

$$\bar{V}_s = (j\omega L + r_L)\bar{I}_s + \bar{V}_c \quad (8)$$

Derivado del análisis de la ecuación 8, la transferencia de potencia activa por el convertidor está asociada a la componente real de la corriente [Li, 2007], por lo que se debe obtener un fasor de corriente  $I_s$  con un ángulo de desfase de  $0^\circ$  para el

modo de operación rectificador activo, y un ángulo de desfase de  $180^\circ$  para que opere como un inversor que inyecta potencia a la red eléctrica. La representación gráfica del método para obtener estos vectores de corriente real se muestra en la figura 4a.

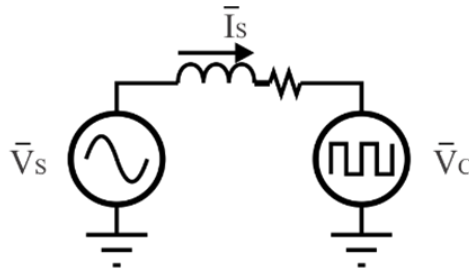


Figura 3 Circuito monofásico equivalente del convertidor del lado de la red.

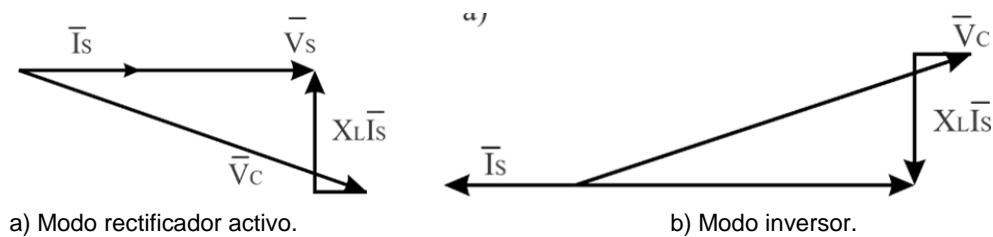


Figura 4 Diagramas fasoriales.

Para el caso cuando el convertidor trabaja como rectificador activo, donde la caída de tensión en la impedancia es un fasor adelantado  $90^\circ$ , que resulta en la corriente en fase con la tensión de red. En la figura 4b se muestra el diagrama fasorial cuando el inversor operar como inversor que inyecta corriente a la red eléctrica, en este caso el fasor de la tensión en inductor debe de estar atrasado  $90^\circ$ , de manera que se obtiene una corriente a  $180^\circ$  desfaseamiento. Si además se desea obtener potencias reactivas en el convertidor, se puede realizar obteniendo fasores de corriente con ángulos de desfaseamiento diferentes a  $0^\circ$  y  $180^\circ$ .

Para implementar una estructura de control del convertidor en el lado de la red es necesario obtener un modelo del convertidor que permita analizar su comportamiento dinámico, para lo cual se obtiene el sistema de ecuaciones 9 que sirve para encontrar las corrientes en cada una de las ramas del convertidor [Chaojun, 2014].

$$\begin{aligned}
 L_{Rred} \frac{d i_a(t)}{dt} &= v_{s_a}(t) - VDC_{S_a}(t) - rLi_a(t) \\
 L_{Rred} \frac{d i_b(t)}{dt} &= v_{s_b}(t) - VDC_{S_b}(t) - rLi_b(t) \\
 L_{Rred} \frac{d i_c(t)}{dt} &= v_{s_c}(t) - VDC_{S_c}(t) - rLi_c(t)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Donde las tensiones que representan a la red son las mostradas en la ecuación 10.

$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= V_m \cos(\omega t) \\
 v_b(t) &= V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\
 v_c(t) &= V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

Para el lado del bus de corriente directa, la ecuación 11 sirve para encontrar la tensión en el bus de corriente en función de las corrientes de alterna y los estados del convertidor, en este modelo también se considera la corriente consumida o entregada por el convertidor en el lado del rotor  $I_l$ .

$$\frac{dV_{cd}(t)}{dt} = \frac{1}{C_{Link}} ((S_a(t)i_a(t) + S_b(t)i_b(t)) + S_c(t)i_c(t) - I_l) \tag{11}$$

Dado que las corrientes y tensiones del sistema de ecuaciones 9 son variantes en el tiempo y del tipo sinusoidal, la estructura de control para obtener las corrientes deseadas se torna muy compleja, por lo que se plantea el uso del control vectorial, que originalmente se emplea en el control de motores de corriente alterna, donde se realiza la conversión del modelo en un sistema de ecuaciones en tres dimensiones a un modelo bidimensional en un marco de referencia síncrono utilizando las transformaciones de Park y Clarke, las cuales se expresan en las ecuaciones 12 y 13, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_0(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ v_\phi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & \text{sen}(\phi) & 0 \\ -\text{sen}(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \\ v_\phi(t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Una vez que el modelo es transformado se obtiene un sistema equivalente en el marco de referencia síncrono, expresado en la ecuación 14. Al analizar las ecuaciones se observa que se encuentra acopladas la una con la otra, por lo que, al realizar un cambio en las señales de entrada de una ecuación, ésta también afecta a la otra, además agrega la complicación de que estos acoplamientos hacen que el sistema de ecuaciones sea un sistema no lineal.

$$\begin{bmatrix} L_{red} \frac{di_d(t)}{dt} = v_{s_d}(t) - VDCs_d(t) - r_L i_d(t) - \omega L_{red} i_q(t) \\ L_{red} \frac{di_q(t)}{dt} = v_{s_q}(t) - VDCs_q(t) - r_L i_q(t) - \omega L_{red} i_d(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Para ello se ha ideado el uso de una estructura llamada red de desacople en el lazo de control de corriente que cancele estos dos términos en el sistema de ecuaciones haciéndolas independientes [Liserre. 2003], esta red de desacople se coloca después de los controladores en el lazo de corriente. La red mencionada es conocida en la literatura como “feedforward” y se muestra en la figura 4.

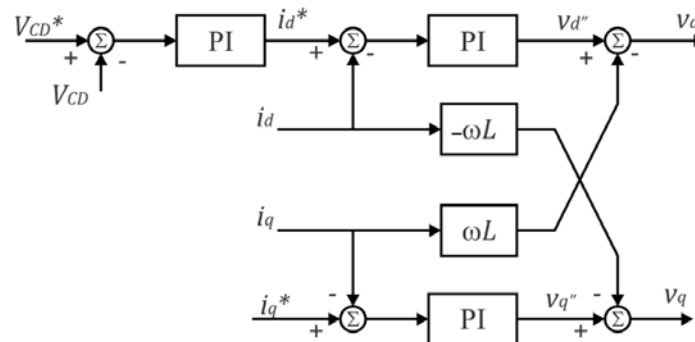


Figura 4 Lazo de control convertidor del lado de la red con la estructura feedforward.

Para el desarrollo de esta estructura se ha considerado a la tensión de la red como una perturbación, por lo cual es posible no considerarla en el análisis. Finalmente se hace un cambio de variable expresando las nuevas tensiones de salida en la ecuación 15.

$$\begin{aligned}v_d(t) &= v'_d(t) + \omega L_{red} i_q(t) \\v_q(t) &= v'_q(t) - \omega L_{red} i_d(t)\end{aligned}\tag{15}$$

Al sustituir en las ecuaciones del sistema se cancelan los acoplamientos que aparecen por la transformación al marco de referencia síncrono. De esta forma es posible obtener las funciones de transferencia de las corrientes del convertidor como se expresan en las ecuaciones 16 y 17, las cuales se usan para calcular los controladores que se utilizan en el lazo de corriente.

$$G_{id}(s) = \frac{i_d(s)}{v'_d(s)} = \frac{1}{r_L + sL}\tag{16}$$

$$G_{iq}(s) = \frac{i_q(s)}{v'_q(s)} = \frac{1}{r_L + sL}\tag{17}$$

Para sencillez de este análisis se considerará una operación sin componentes reactivos, por lo que la componente de corriente en el marco de referencia síncrono  $i_q$  es cero, para ello se establece que la referencia en la estructura de control de esta componente sea igual a cero. Tomando en cuenta estas consideraciones la función de transferencia resultante se muestra en la ecuación 18. En este caso se consideró un modelo de señal pequeña que estudia la variación de la tensión de CD alrededor de un punto de operación, para este caso los valores de  $I_L$  y  $V_{CD}$  son los correspondientes a los valores máximos de diseño del convertidor.

$$G_{VCD}(s) = \frac{v_{CD}(s)}{i_d(s)} = \frac{1}{s C_{CD} + \frac{I_L}{V_{CD}}}\tag{18}$$

Una vez obtenidas las funciones de transferencia del convertidor se realiza el diseño de los controladores para cada uno de los lazos del convertidor, en este caso y como se ha presentado en distintos trabajos [Chaojun, 2014] y [Lisserre, 2003], se han propuesto controladores del tipo Proporcional-Integral (PI) en cada uno de los lazos. Para ello se parte la representación en forma de un cero en el origen y un polo, como se expresa en la ecuación 19, y se realiza la sintonización empleando los diagramas de Bode, de manera de establecer un margen de fase a una frecuencia de cruce deseada.



$$H_{id}(s) = k_p \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \quad (19)$$

Se inicia el diseño de los lazos de control se considerando los datos de la tabla 2, que contiene los parámetros del convertidor. El procedimiento de diseñar el controlador utilizando diagramas de Bode tiene como objetivo obtener una respuesta con la velocidad y forma requeridas. Para el caso del lazo de corriente de acuerdo a las características de diseño, este se suele diseñar con una frecuencia de cruce en un orden de magnitud por debajo de la frecuencia de conmutación  $\omega_{idc} \leq 10\omega_{SW}$  (ecuaciones 20 y 21), para que este rechace los efectos transitorios de la frecuencia de conmutación.

$$\|H_{id}(s)G_{id}(s)\|_{s=j\omega_c} = 1 \quad (20)$$

$$\angle H_{id}(s)G_{id}(s)|_{s=j\omega_c} = MF - 180^\circ \quad (21)$$

Para el lazo de la tensión del Bus de CD se debe de considerar la función en lazo cerrado de lazo de corriente considerando  $G_{olid}(s) = H_{id}(s)G_{id}(s)$ . La función en lazo cerrado se define con la ecuación 22.

$$G_{clid}(s) = \frac{G_{olid}(s)}{1 + G_{olid}(s)} \quad (22)$$

Utilizando la función de transferencia de corriente obtenida en la ecuación 16, y sustituyendo en la función 22 se obtiene la función de la tensión en el bus de DC con los parámetros del convertidor y el controlador de corriente. Se sintoniza el controlador del lazo de tensión utilizando el diagrama de Bode de la función obtenida para obtener un margen de fase a una frecuencia de corte deseada. En este caso la recomendación que hay en la literatura, es que sea de un orden de magnitud por debajo de la frecuencia de cruce del lazo cerrado de corriente.

$$\|H_{VDC}(s)G_{VDC}(s)G_{clid}(s)\|_{s=j\omega_c} = 1 \quad (23)$$

$$\angle H_{VDC}(s)G_{VDC}(s)G_{clid}(s)|_{s=j\omega_c} = MF - 180^\circ \quad (24)$$

Los parámetros elegidos para el diseño, en el caso del lazo de corriente serian una frecuencia de corte a los 1000 Hz con un margen de fase de 89° que se utilizarán

en las ecuaciones 23 y 24, con lo que se obtiene una respuesta sobreamortiguada sin sobretiros de corriente para evitar exceder límites de corriente del convertidor, y aun así conservar una velocidad de respuesta adecuada. En este caso los valores del controlador son  $Ki = 1500$  y  $Kp = 15$ , que resultan en la función 25.

$$H_{id}(s) = 15 \frac{s + 100}{s} \quad (25)$$

Para la sintonía del lazo de tensión se designó una frecuencia de corte 80 Hz que permite lograr una recuperación de las perturbaciones dentro de un solo ciclo de la tensión de entrada, además con un margen de fase de  $65^\circ$  se obtiene una respuesta rápida y con un sobre impulso menor al 1.2 de la tensión de referencia, para lo cual los parámetros del controlador son  $Ki = 450$  y  $Kp = 1.927$  y la función de transferencia resultante, ecuación 26.

$$H_{VDC}(s) = 1.927 \frac{s + 233}{s} \quad (26)$$

### **3. Resultados**

Para la verificación del diseño, se hicieron simulaciones en Simulink™ para demostrar la capacidad de los controladores propuestos para funcionar como inversor o rectificador y realizar la transición entre los dos estados al momento que el convertidor del lado del rotor demanda o entrega energía al bus de CD.

La primera prueba (figura 5) realizada es la transición del modo de operación de rectificador a inversor utilizado una rampa de corriente que va de la máxima salida, es decir  $I_L = 11.78 A$  para los 1650 W hasta la corriente máxima como inversor  $I_L = -11.78 A$ . Esta transición ocurre en un tiempo de 50ms, para ello se utiliza una fuente controlada de corriente en el bus de CD que simula la salida del convertidor en el lado de la máquina, donde se observa primero la tensión del enlace de CD contra las corrientes del convertidor, y contra las corrientes en el marco de referencia síncrono. La siguiente prueba (figura 6) consiste en un escalón de corriente que va del valor máximo hasta el mínimo, esto es con la finalidad conocer la respuesta del sistema a una variación abrupta en la carga, el escalón de corriente es apreciable en las gráficas de corriente en el marco de referencia síncrono.

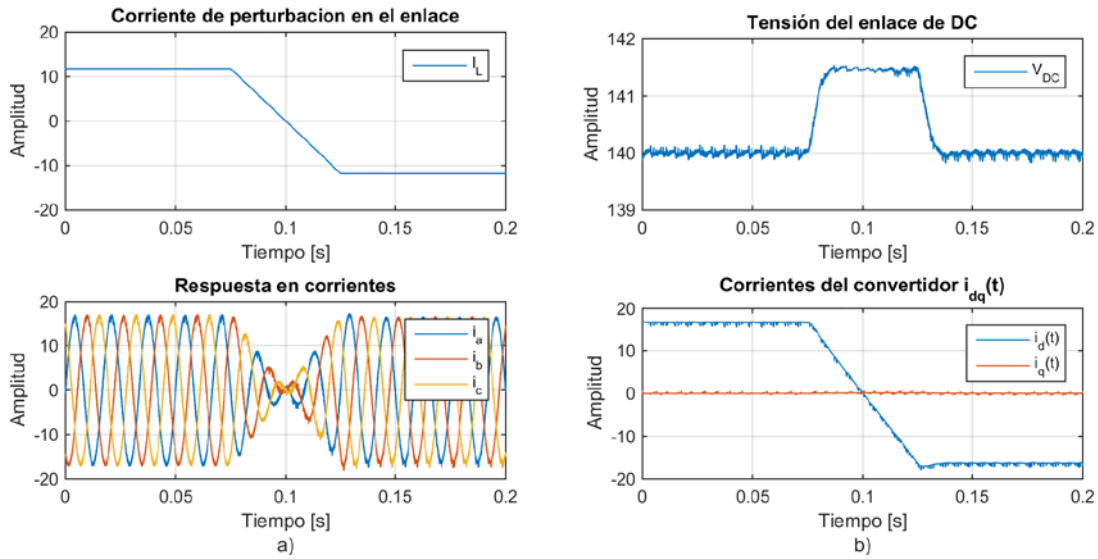


Figura 5 Resultados de simulación para la respuesta a perturbación en forma de rampa.

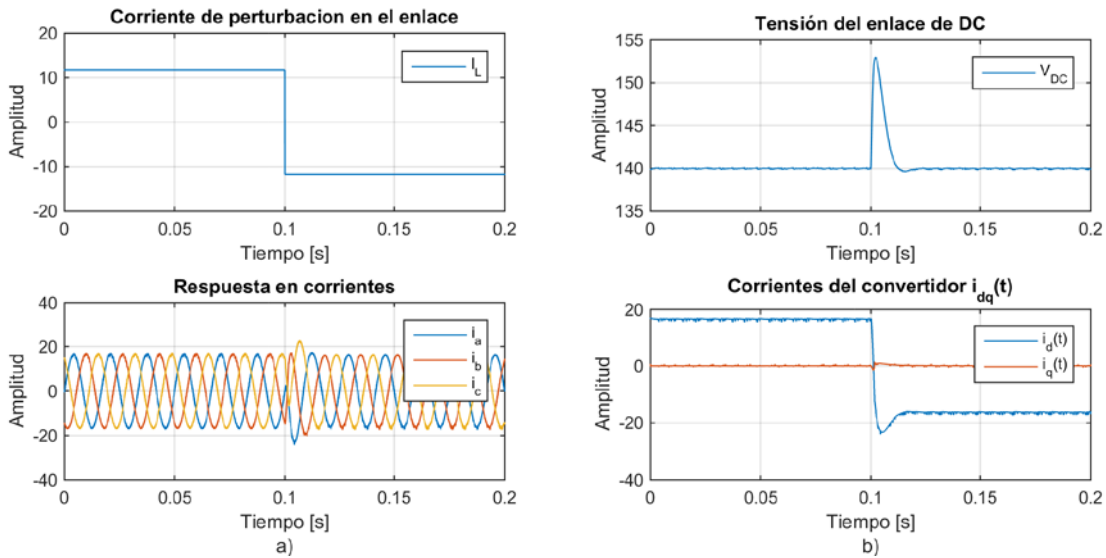


Figura 6 Resultados de simulación para la respuesta a una perturbación del tipo escalón.

#### 4. Discusión

En la figura 5 se muestra su respuesta a la rampa, en esta se observa que durante la rampa el convertidor tiene en la tensión de red una desviación con respecto a la referencia del bus de CD, esto es debido a la característica de error que tiene el control integral al seguir rampas u otras señales variantes en el tiempo. La función rampa utilizada es representativa de un caso donde existe una transición gradual

de velocidad o par en el sistema de generación el cual al pasar del modo velocidad supersíncrona a subsíncrona demanda potencia al bus de CD en lugar de entregarla a esta, esta simulación muestra el caso más extremo para esta aplicación.

En el caso de la respuesta a una perturbación tipo escalón el sobreimpulso observado se mantiene por debajo de 1.2 veces el valor de la referencia y un tiempo de recuperación de 15 ms (figura 6), este resultado coincide con el comportamiento calculado en el diseño de los lazos de control, esta prueba se realizó principalmente para conocer el desempeño del sistema y las estructuras de control propuestas, dado que hay una poca posibilidad de que se presente un caso de este tipo, solamente sirve para conocer el límite del sistema.

## **5. Conclusiones**

En la literatura comúnmente se suele presentar las estructuras de control de este tipo de convertidor únicamente para la aplicación en modo rectificador activo, no se suele presentar su utilidad como inversor para la inyección de potencia a la red eléctrica. la propuesta de utilizar un lazo de control de voltaje en conjunto con el control de corriente parte del hecho de que en el convertidor back to back, la parte que se encuentra conectada al generador se suele comportar como una fuente de corriente que demanda o entrega energía al bus de CD durante la operación del sistema de generación eólica propuesto, por lo cual la otra sección del convertidor se debe de encargar de mantener una tensión constante en el mismo, en este caso se verifican la capacidad del convertidor de hacer la transición entre los dos modos en durante la operación sin interrupciones, por lo que el uso de esta estructura propuesta se considera apropiada para la aplicación.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Abad, G. Doubly fed induction machine: modelling and control for wind and energy generation. IEEE Wiley. New Jersey, USA. 2011.
- [2] Chaojun, W., & Yanbin, Z. Vector control of three-phase voltage source PWM rectifier based on fractional-order controller. Control and Decision Conference (2014 CCDC). Changsha, China. 2014.

- [3] Alvarado, J. Implementación del accionamiento de un motor de inducción utilizando tecnología ARM. Tesis de maestría. Ciudad de Mexico, 2017.
- [4] Bose, B. K. Modern Power Electronics and AC Drives. New jersey: Prentice Hall. 2002.
- [5] Fairchild Semiconductor Industries, FNA25060, 600 V Motion SPM 2 Series. USA, 2015.
- [6] Fateh, W. & N. White, A Maximum Power Tracking Technique for Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE, 957 – 966, 2015.
- [7] Holmes, G. D., & Lipo, T. Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice. Chicago, John Wiley & Sons. 2003.
- [8] Isen, E., & Faruk, A. B., 10 kW grid-connected three-phase inverter system: Control, simulation and experimental results. 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Aalborg, Denmark, 2012.
- [9] Jianfeng, F., & Guobing S, S. Exploration of a DC wind farm integrated by variable-speed squirrel cage induction generator (SCIGs). The Journal of Engineering , 1488 - 1493. 2017.
- [10] Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. Control in Power Electronics Selected Problems. San Diego, California: Academic Press. 2002.
- [11] Li, S., Haskew, T. A. Analysis of decoupled d-q Vector Control in DFIG Back-to-Back PWM converter. Power Engineering Society General Meeting, 2007. Tampa, FL, USA. 2007.
- [12] Mohan, N., Undeland, T. M. Power electronics: converters, applications, and design. Minnesota: John Wiley & Sons. 1989.
- [13] Xu, j., & Ji, L., Control of three-phase grid-connected LCL-filtered inverters with adaptability to non-ideal grid, IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), Hefei, China, 2016.
- [14] Liserre, M., Dell'Aquila, A., & Blaabjerg, F. Design and control of a three-phase active rectifier under non-ideal operating conditions. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Pittsburgh, PA, USA. 2003.

# MODELO DE CÁLCULO DE IRRADIANCIA CONSIDERANDO SOMBREADO PARA CAMPOS DE COLECTORES SOLARES

## MODEL OF IRRADIANCE CALCULATION CONSIDERING SHADING FOR SOLAR COLECTOR FIELDS

**Santiago Sánchez Carbajal**

Universidad Panamericana  
*santiagoscarbajal@gmail.com*

**Pedro Manuel Rodrigo Cruz**

Universidad Panamericana  
*prodrigo@up.edu.mx*

### Resumen

En campos de colectores solares, bien sean fotovoltaicos o de colectores solares térmicos, existen siempre pérdidas de energía debido al autosombreado entre filas paralelas de colectores. Esto añade cierta complejidad a la hora de optimizar el diseño de las plantas o de predecir la energía que generarán. En este artículo se desarrolla un modelo de cálculo de irradiancia considerando el sombreado para campos de colectores solares montados en terreno horizontal, con filas paralelas de colectores de idéntica anchura. Para el modelo se utilizan datos de irradiancia y temperatura de un año típico de Aguascalientes, México, generado a partir de datos registrados durante 10 años por una estación meteorológica en intervalos de 10 minutos. Se presentan resultados del modelo aplicado a Aguascalientes con topologías de plantas típicas y se comparan con cálculos estándar de irradiancia que no consideran el efecto del sombreado. Aplicando la regla del solsticio de invierno para obtener la separación entre filas de colectores, se han calculado unas pérdidas anuales de energía incidente del 0.54% debidas al efecto de sombreado.

**Palabras Claves:** Cálculo de irradiancia, energía solar, sombreado.

### Abstract

*In solar collector fields, either photovoltaic or solar thermal fields, there are always energy losses due to self-shading between parallel rows of collectors. This implies*

*more complexity when optimizing the plant design or when predicting the harvested energy. In this paper, we develop a model for calculating the irradiance considering shading for solar collector fields installed on a horizontal land with parallel collector rows of the same width. The model uses irradiance and temperature data of a typical year for Aguascalientes, Mexico, generated from data registered during 10 years at a meteorological station in 10-minute intervals. We present results of the model applied to Aguascalientes with typical plant topologies and we compare against standard irradiance calculations that do not consider the effect of shading. Using the winter solstice rule to get the spacing between rows of collectors, annual energy losses of 0.54% have been calculated due to the shading effect.*

**Keywords:** *Irradiance calculation, shading, solar energy.*

## **1. Introducción**

El diseño, optimización y predicción de energía en plantas de colectores solares (tanto fotovoltaicos como térmicos) no sólo se enfrenta a las dificultades de variabilidad del recurso solar, sino que existen diferentes factores que afectan a la operación real de este tipo de sistemas. Entre ellos pueden citarse la deposición de suciedad sobre las superficies colectoras, o el problema del sombreado. Estos factores son responsables de que las predicciones de energía realizadas mediante métodos convencionales resulten optimistas y alejadas del comportamiento real. En este artículo se desarrolla un modelo de cálculo de irradiancia considerando uno de estos factores, el autosombreado entre filas de colectores.

En la literatura científica, se han propuesto diferentes modelos para el cálculo de las pérdidas de energía por sombreado en campos de colectores solares. Los autores suelen utilizar estos modelos para optimización de las plantas, por ejemplo, para obtener la orientación e inclinación óptima del campo de colectores, o para obtener la distancia óptima de separación entre filas de colectores. Algunos de estos trabajos se resumen a continuación:

En [Groumpos, 1987], se analizó la sombra generada por una fila de colectores sobre la fila siguiente, considerando la posibilidad de variar la anchura de las filas y la orientación de los colectores. Se desarrolló un algoritmo para calcular el factor de

sombreado de cada fila, incluyendo algunos casos de sistemas con seguimiento solar.

En [Cooper, 2016], se generó un algoritmo basado en vectores para azoteas con pendiente constante y orientación de los colectores variable, que optimiza la distancia entre filas de colectores basándose en una regla bajo la condición del solsticio de invierno.

En [Elsayed, 1991], los autores proponen un algoritmo que calcula el factor de sombreado para un arreglo de múltiples líneas, permitiendo que las líneas tengan diferente ancho. No se presenta optimación en distancia entre filas.

En [Weinstock, 2004], el problema con el dimensionamiento fotovoltaico es presentado como un problema de optimación con restricciones. Se proponen múltiples funciones objetivo como energía máxima incidente anual, superficie mínima, costos de planta mínimos y costo mínimo por unidad de energía producida. La metodología general fue aplicada a múltiples casos específicos en donde diversos parámetros de optimación fotovoltaica fueron aplicados, incluyendo la separación entre filas.

En [Awad, 2016] se propuso un sistema analítico jerárquico para ordenar los factores decisivos y así poder determinar la inclinación óptima y la separación entre filas para azoteas planas en climas fríos. El costo de capital y el periodo de amortización de la inversión son considerados. Para efectos de cálculo de sombreado se consideraron los días 21 de cada mes.

Al analizar los modelos de cálculo de irradiancia bajo sombreado existentes en la literatura, se pudo observar que ninguno de ellos utiliza una notación normalizada. Mediante una notación normalizada es posible analizar escenarios de configuración de plantas más generales que con una notación convencional. Por ejemplo, es preferible utilizar en estos modelos la distancia libre entre dos filas de colectores normalizada a la altura de los colectores, que en su lugar la distancia libre entre dos filas de colectores sin normalizar. Mediante la primera opción, dando solo valor al parámetro, se estará analizando una gran diversidad de plantas con diferente altura de colectores, mientras que mediante la segunda opción se requiere dar diferentes valores al parámetro para analizar diferentes escenarios de altura de colectores.



En este artículo se desarrolla un modelo de cálculo de irradiancia bajo condiciones de autosombreado entre filas de colectores válido para campos de colectores (fotovoltaicos o térmicos) montados sobre terreno horizontal y con filas paralelas de idéntica anchura. El modelo tiene la ventaja de utilizar notación normalizada frente a los modelos existentes en la literatura.

Aunque el modelo puede aplicarse a cualquier localización donde existan datos disponibles de irradiancia solar y temperatura, en este artículo se aplica al caso concreto de Aguascalientes, México. Para ello, se ha generado una serie representativa del clima típico de Aguascalientes, a partir de 10 años de medidas registrados por una estación meteorológica ubicada cerca del centro de la ciudad. La utilización de un año climatológico típico generado a partir de datos reales otorga más precisión a los resultados que la utilización meramente de valores medios mensuales como los que ofrecen las bases de datos meteorológicas en línea, basadas en imágenes de satélite, como por ejemplo la base de datos de NASA SSE [NASA, 2008], entre otras.

## **2. Métodos**

### **Datos meteorológicos**

El estudio está basado en los datos de irradiancia global horizontal ( $G_{hor}$ ) y temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) registrados por una estación meteorológica situada cerca del centro de la ciudad de Aguascalientes (21.9°N, -102.3°E), tomando como datos desde diciembre 2005 hasta abril 2015 con intervalos de 10 minutos para cada medida. Este gran volumen de datos fue procesado para obtener el año meteorológico típico de la ciudad de Aguascalientes. El proceso de generación del año típico consistió en calcular la irradiación global horizontal para cada mes tomando los datos de cada mes de la base de datos y calcular el promedio de irradiación mensual horizontal para cada mes (enero, febrero, etc...); después de eso se buscó el mes en la base de datos que más se asemeja al promedio de irradiación mensual horizontal. Este mes es seleccionado como uno de los meses del año típico meteorológico. Como resultado se tomaron 12 meses de diferentes años para representar el año meteorológico típico de la ciudad.

Para poder asegurar que los datos generados para el año meteorológico de la ciudad representan verazmente las condiciones climatológicas de la región, se validaron los histogramas de  $G_{hor}$  y  $T_{amb}$  comparando los datos generados con la base de datos de 10 años. Estos histogramas se muestran en la figura 1. Como se puede observar hay muchas similitudes entre los histogramas del año típico generado y el histórico de 10 años. Por lo tanto, se pueden utilizar los datos generados como una representación veraz del clima de Aguascalientes. De hecho, éste es un aspecto relevante del estudio realizado, ya que se basó cada simulación tomando en cuenta el año típico con intervalos de 10 minutos, mientras que muchos autores hacen este tipo de cálculos usando valores en intervalos de una hora, muy a menudo a partir de valores promedio mensuales tomados de una base de datos en línea. Por lo tanto, los datos meteorológicos presentados son mucho más precisos que los que se usan regularmente en la literatura.

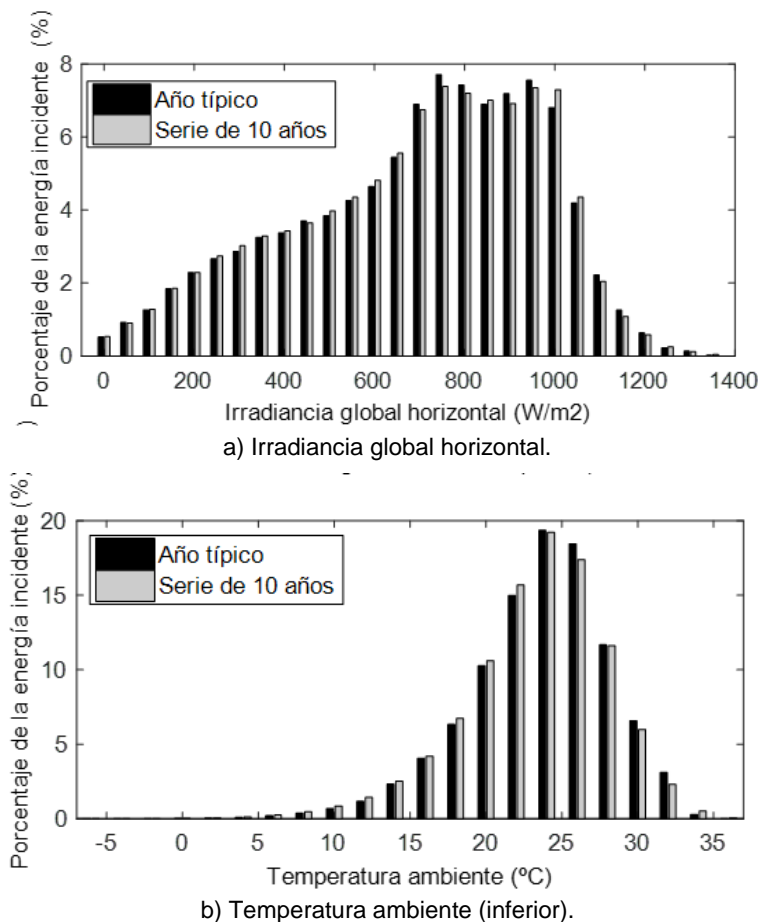


Figura 1 Histogramas anuales entre el año típico generado y base de datos 10 años.

Las entradas para el modelo de cálculo de irradiancia son la irradiancia difusa horizontal ( $D_{hor}$ ) y la irradiancia directa horizontal ( $B_{hor}$ ). Estos datos no son directamente proporcionados por la base de datos meteorológica, y por esta razón fueron calculados mediante la correlación entre la fracción difusa y el índice de claridad de Iqbal [Iqbal, 1983]. Los detalles del cálculo se pueden leer en la contribución [Rodrigo, 2016].

### Cálculos de irradiancia considerando autosombreado entre filas

Los ángulos básicos que determinan la posición de los colectores solares y el sol se encuentran definidos en la figura 2. Para el posicionamiento de los colectores solares se muestran la orientación ( $\alpha$ ) y la inclinación del módulo ( $\beta$ ) ( $\alpha = 0^\circ$  significa que el colector solar está mirando directamente al ecuador). Para posicionamiento del sol se necesitan el azimut ( $\psi$ ) y la elevación ( $\gamma$ ) ( $\psi = 0^\circ$  significa que el sol viene desde el ecuador).

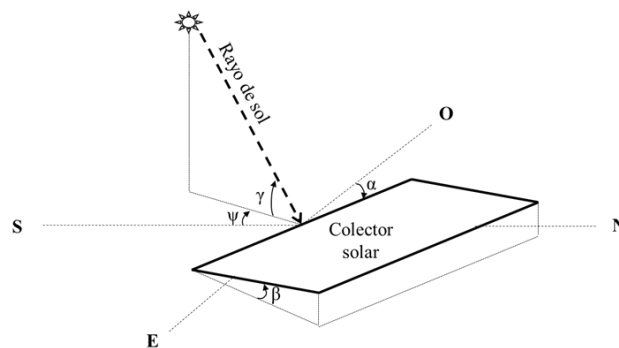


Figura 2 Ángulos que definen la posición del sol y del arreglo fotovoltaico.

Las magnitudes mostradas en la figura 3, se usan para poder considerar sombreado creado entre filas. La distancia libre entre dos filas adyacentes se denomina como  $d$ . Este valor, en conjunto con la inclinación  $\beta$  y la altura del colector  $l$ , son los responsables de definir la separación entre las filas. Has que mencionar que la altura del colector puede variar ya que se pueden colocar varias líneas de colectores coplanarmente, y no necesariamente tiene que ser la altura de un solo colector solar. La separación entre filas se obtiene mediante  $l \cos \beta + d$ , como se muestra en la figura.  $L$  y  $W$  son el largo y el ancho de la planta respectivamente.

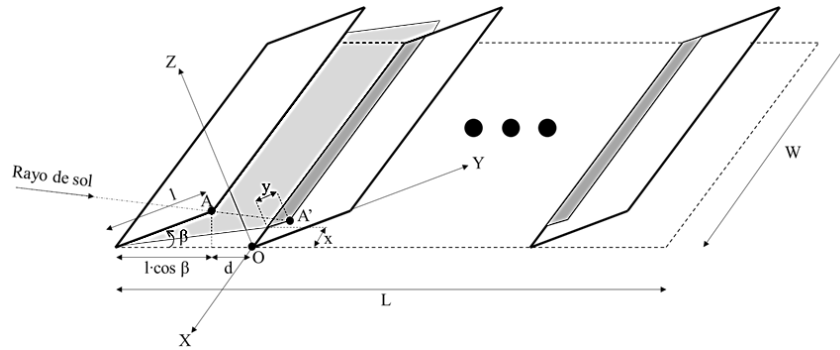


Figura 3 Cálculos geométricos para autosombreado entre filas de colectores solares.

Para obtener el rectángulo sombreado en una fila causado por la fila anterior, las coordenadas del punto A' en la referencia OXYZ son necesarias. El punto A' es la intersección de la línea paralela a la dirección de los rayos solares y que pasa por el punto A (el punto que se encuentra en la esquina superior de la fila anterior) con el plano de fila sombreada. Esta intersección se puede expresar matemáticamente según la ecuación 1.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ l \\ 0 \end{bmatrix} - R_2 \begin{bmatrix} 0 \\ l \cos \beta + d \\ 0 \end{bmatrix} + \lambda R_2 R_1 \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \gamma \\ -\text{sen } \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $R_1$  y  $R_2$  son las siguientes matrices de rotación descritas en las ecuaciones 2 y 3.

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos(\psi - \alpha) & \text{sen}(\psi - \alpha) & 0 \\ -\text{sen}(\psi - \alpha) & \cos(\psi - \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \text{sen } \beta \\ 0 & -\text{sen } \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Las tres expresiones en la ecuación 1, contienen tres incógnitas:  $x$ ,  $y$  y  $\lambda$ . Resolviendo la tercera expresión se puede determinar  $\lambda$  como se indica en la ecuación 4.

$$\lambda = \frac{\frac{l \cos \beta + d}{\cos \gamma}}{\cos(\psi - \alpha) + \frac{\tan \lambda}{\tan \beta}} \quad (4)$$

El signo del parámetro  $\lambda$  indica si el sol proviene de la parte frontal de los colectores ( $\lambda > 0$ ) o de la parte posterior ( $\lambda \leq 0$ ). La condición  $\lambda > 0$  es equivalente a  $\cos(\psi - \alpha) + \frac{\tan\gamma}{\tan\beta} > 0$ . Resolviendo la primera y segunda expresión en la ecuación 1 se pueden determinar tanto  $x$  como  $y$  de manera similar.

En este estudio, se utiliza notación normalizada para poder realizar los análisis de la manera más general posible. Se usarán las siguientes variables normalizadas a la altura del colector  $l$ :  $d/l, W/l, x/l, y/l$ . El objetivo del análisis de sombreado es obtener dos factores de sombreado:  $f_{s1}$  (factor de sombreado para la primera fila de la planta) y  $f_{s2}$  (factor de sombreado para las filas subsecuentes de la planta). El factor de sombreado representa el porcentaje de área sombreada respecto al área total de la fila. Usando la notación normalizada, estos porcentajes de sombreado pueden ser calculados mediante el algoritmo definido las ecuaciones 5.

$$\lambda_0 = \cos(\psi - \alpha) + \frac{\tan\gamma}{\tan\beta}$$

$$\text{If } \lambda_0 \leq 0 \text{ then } f_{s1} = f_{s2} = 1$$

$$\text{Else } \left[ \begin{array}{l} f_{s1} = 0 \\ \frac{x}{l} = \left( \cos\beta + \frac{d}{l} \right) \frac{\text{sen}(\psi - \alpha)}{\lambda_0} \\ \frac{y}{l} = 1 - \left( \cos\beta + \frac{d}{l} \right) \frac{\tan\gamma}{\lambda_0 \text{sen}\beta} \\ \text{If } \frac{y}{l} \leq 0 \text{ then } f_{s2} = 0 \\ \text{Elseif } \left( \frac{x}{l} \leq -\frac{W}{l} \right) \text{OR} \left( \frac{x}{l} \geq \frac{W}{l} \right) \text{ then } f_{s2} = 0 \\ \text{Else } f_{s2} = \left( 1 - \frac{|x/l|}{W/l} \right) y/l \end{array} \right] \quad (5)$$

Los factores de sombreado se utilizarán para corregir la irradiancia directa incidente en las filas de colectores solares. La irradiancia difusa y de albedo debe ser calculada partiendo de la irradiancia horizontal difusa y la global horizontal respectivamente aplicando las llamadas correcciones de “factores de vista de cielo”. Podemos distinguir dos factores de vista de cielo:  $F_{sky1}$  (para la primera fila de la planta) y  $F_{sky2}$  (para las filas subsecuentes). Estos factores pueden ser calculados mediante las expresiones propuestas en [Maor, 2012] según ecuaciones 6 y 7.

$$F_{sky1} = \frac{1 + \cos\beta}{2} \quad (6)$$

$$F_{sky2} = \frac{1 + \cos\beta + \frac{d}{l} - \sqrt{\text{sen}^2\beta + \left(\frac{d}{l}\right)^2}}{2} \quad (7)$$

A partir de estos factores de vista de cielo, se pueden calcular tanto la irradiancia difusa ( $D_i$ ) y de albedo ( $A_i$ ) en las filas de colectores tal y como se indica en las ecuaciones 8 a 11 (tomando en cuenta que se hace la distinción entre fila 1 con el subíndice “1” y la segunda y subsecuentes filas con el subíndice “2”):

$$D_1 = F_{sky1}D_{hor} \quad (8)$$

$$D_2 = F_{sky2}D_{hor} \quad (9)$$

$$A_1 = \rho G_{hor}(1 - F_{sky1}) \quad (10)$$

$$A_2 = \rho G_{hor}(1 - F_{sky2}) \quad (11)$$

Donde  $\rho$  es el coeficiente de albedo. Está fijado a 0.2 en el presente estudio ya que se está considerando un entorno urbano. La irradiancia directa incidente sobre los colectores (antes de ser corregida con el sombreado),  $B$ , se puede calcular a partir de la irradiancia directa horizontal  $B_{hor}$  según la ecuación 12.

$$B = B_{hor} \frac{\cos\theta_n}{\cos(90^\circ - \gamma)} \quad (12)$$

Donde  $\theta_n$  es el ángulo de incidencia de los rayos solares respecto a la normal de los colectores, el cual puede obtenerse mediante relaciones trigonométricas. Finalmente, la irradiancia global incidente sobre las filas de colectores considerando las áreas sombreadas,  $G_1$  y  $G_2$ , se pueden calcular mediante ecuaciones 13 y 14.

$$G_{s1} = (1 - f_{s1})B + D_1 + A_1 \quad (13)$$

$$G_{s2} = (1 - f_{s2})B + D_2 + A_2 \quad (14)$$

La irradiancia global promedio de la planta completa ( $G_s$ ) puede ser obtenida considerando el número de filas que la componen ( $N_r$ ), según la ecuación 15.

$$G_s = \frac{G_s + (N_r - 1)G_{s2}}{N_r} \quad (15)$$

Donde  $N_r$  se puede expresar como una función de las magnitudes normalizadas que definen la planta de colectores (ecuación 16).

$$N_r = \frac{\frac{W}{L}}{\frac{W}{L} (\cos\beta + \frac{d}{L})} \quad (16)$$

$W/L$  es el ratio de aspecto de la planta o la relación entre el ancho y el largo de la planta. Con este procedimiento  $G_s$  puede ser obtenido para cada intervalo de tiempo. El cálculo de la irradiación global anual incidente sobre la planta de colectores en kWh/(m<sup>2</sup> año),  $H_s$ , puede hacerse mediante la sumatoria descrita en la ecuación 17.

$$H_s = \frac{\sum_i G_{si} \Delta t}{1,000} \quad (17)$$

Donde  $\Delta t$  es el periodo de tiempo empleado para calcular la irradiancia (1/6 hr para este estudio).

### 3. Resultados

El modelo desarrollado permite analizar una gran variedad de configuraciones de plantas, ajustando los parámetros  $\alpha, \beta, d/l, W/l$  y  $W/L$ . Para el presente estudio se han utilizado los valores de parámetros mostrados en la tabla 1. Estos valores pueden considerarse representativos de plantas típicas en Aguascalientes, tal y como se discute a continuación.

Tabla 1 Parámetros del modelo utilizados en el estudio.

Parámetro	Valor	Unidad
$\alpha$	0	°
$\beta$	20	°
$d/l$	0.3864	Adim.
$W/l$	20	Adim.
$W/L$	1	Adim.

La orientación óptima de los colectores solares para maximizar la captura de energía anual es  $\alpha=0^\circ$  (colectores orientados hacia el ecuador, en este caso, hacia

el Sur geográfico). En cuanto al valor de  $\beta$ , se ha establecido una inclinación de los colectores de  $20^\circ$ , coincidente con el ángulo de inclinación típico de las estructuras que se comercializan en la región. Este ángulo es cercano al óptimo para maximizar la captura de energía anual (que según una regla práctica utilizada por los diseñadores de sistemas, coincide con la latitud del sitio, en este caso  $21.88^\circ$ ).

El parámetro  $d/l$  representa el pasillo de separación de las filas de colectores normalizado a la altura de los colectores. En la práctica, los diseñadores de sistemas utilizan la regla del solsticio de invierno para calcular este parámetro. Esta regla consiste en calcular el pasillo de separación para que, en el solsticio de invierno, entre las 10:00 am y las 2:00 pm hora solar, no se produzca autosombreado entre filas. Si se verifica esta regla en el solsticio de invierno (día de menor altura solar), la situación en el resto de días del año será aún más favorable. Mediante la regla del solsticio de invierno aplicada a Aguascalientes, se obtiene un valor  $d/l = 0.3864$ , que es el que se utiliza en el presente estudio.

Finalmente, se ha simulado una planta con  $W/l = 20$ , lo cual significa que la anchura de cada fila es 20 veces mayor que la altura de los colectores, situación que podría considerarse representativa de una planta de pequeño-mediano tamaño. El ratio de aspecto de la planta se ha establecido en  $W/L = 1$ , por lo que se están simulando plantas con forma geométrica cuadrada (anchura de la planta igual a su longitud).

El modelo desarrollado permite diferenciar entre el factor de sombreado de la primera fila ( $f_{s1}$ ) y el de la segunda fila y siguientes ( $f_{s2}$ ). En las figuras 4 y 5 se muestran los factores de sombreado  $f_{s1}$  y  $f_{s2}$  para el solsticio de invierno y el solsticio de verano respectivamente, considerando las primeras horas del día, desde algo antes del amanecer hasta el mediodía solar.

En la figura 4, relativa al solsticio de invierno que es la condición anual más desfavorable en cuanto a sombreado, puede verse que la primera fila nunca se encuentra sombreada. Sin embargo, la segunda y siguientes filas muestran un nivel de sombreado decreciente, desde el amanecer que tiene lugar algo después de las 6:30 am hora solar, hasta aproximadamente las 10:00 am hora solar, momento en que el sol se eleva lo suficiente como para no causar sombreado.



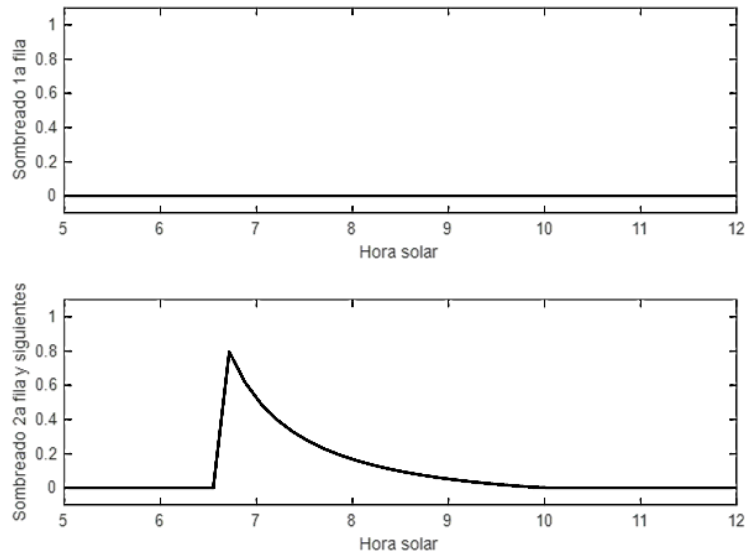


Figura 4 Factores de sombreado en solsticio de invierno durante primeras horas del día.

En la figura 5, relativa al solsticio de verano, puede observarse un comportamiento interesante, tanto en la primera fila como en la segunda y siguientes. Puede verse que aproximadamente entre el amanecer (5:15 am hora solar) y las 6:00 am hora solar, los colectores se encuentran 100 % sombreados, mientras que el resto del día no existe ningún tipo de sombreado. Esto es debido a que en el solsticio de verano el sol sale por el cuadrante Noreste y, por lo tanto, en los primeros momentos del día, los rayos solares llegan de espaldas a los colectores. Esta situación se corrige después de las 6:00 am, cuando el sol alcanza suficiente altura como para enviar sus rayos de frente a los colectores.

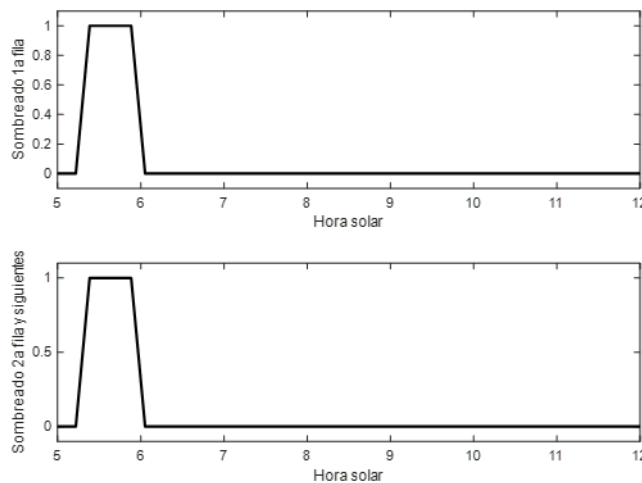


Figura 5 Factores de sombreado en solsticio de verano durante primeras horas del día.

Resulta interesante analizar con el modelo las pérdidas de irradiación mensuales debidas al autosombreado entre filas para las plantas típicas en Aguascalientes. Estos resultados se presentan en la figura 6. En esta figura puede observarse que la diferencia entre la irradiación incidente considerando un sistema ideal sin sombras y la irradiación incidente considerando sombreado es bastante pequeña. Esto quiere decir que la regla del solsticio de invierno funciona bien en Aguascalientes, puesto que implica unas pérdidas por sombreado muy reducidas. En la gráfica se observa que en la mayoría de los meses del año las pérdidas por sombreado son despreciables, salvo en los meses de invierno (noviembre, diciembre, enero y febrero), en los cuales puede apreciarse una irradiación incidente con sombreado algo menor que la del caso ideal. La figura 7 resume el porcentaje de pérdidas de irradiación anuales por sombreado en Aguascalientes siguiendo la regla del solsticio de invierno para el cálculo del espaciado entre filas. Como puede verse este porcentaje de pérdidas por sombreado alcanza sólo el 0.54%. Valores inferiores al 1% de pérdidas resultan adecuados para el diseño de las plantas de colectores solares.

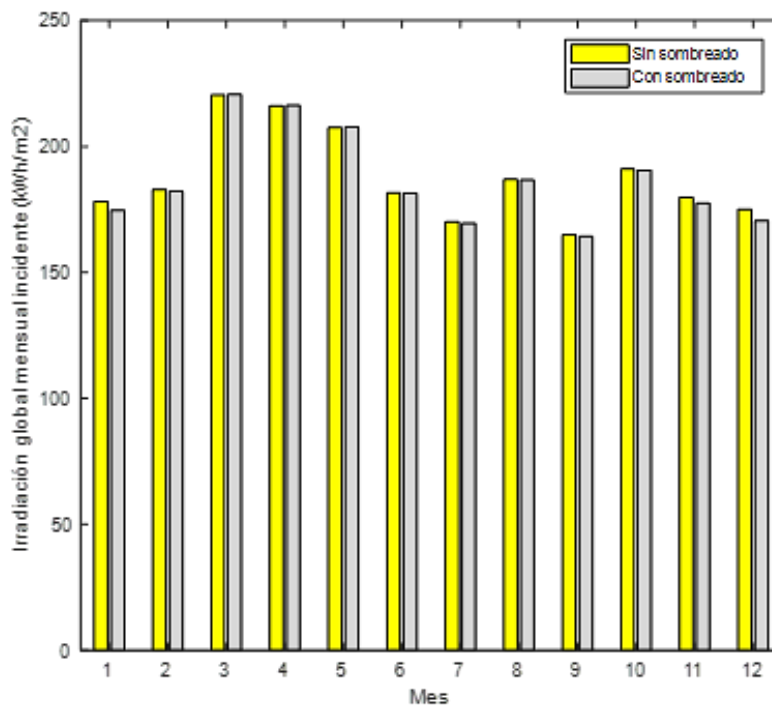


Figura 6 Comparativa mensual de irradiación global incidente sin sombreado y considerando autosombreado entre filas.

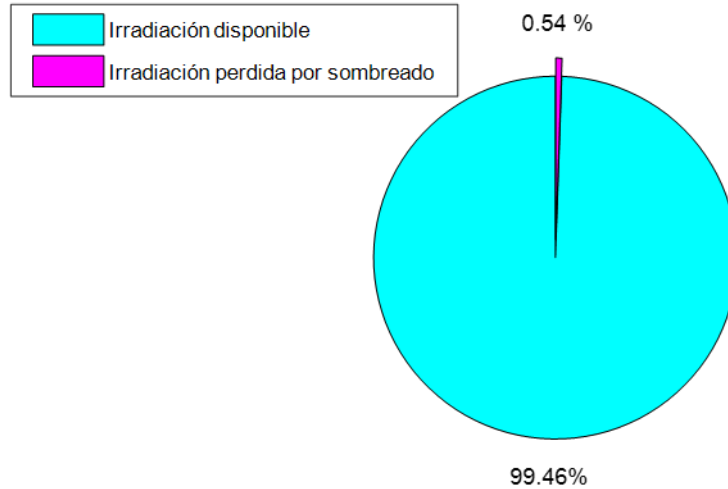


Figura 7 Porcentaje anual de pérdidas de irradiación por sombreado.

#### 4. Discusión

Los valores anteriores ponen de manifiesto que un buen espaciado entre filas de colectores, como el que proporciona la regla del solsticio de invierno, origina un porcentaje de pérdidas por sombreado inferior al 1%. Sin embargo, un mal diseño, con filas excesivamente juntas, podría elevar estos valores de pérdidas más de lo recomendable. Para analizar diferentes espaciados entre filas de colectores, se presenta la figura 8.

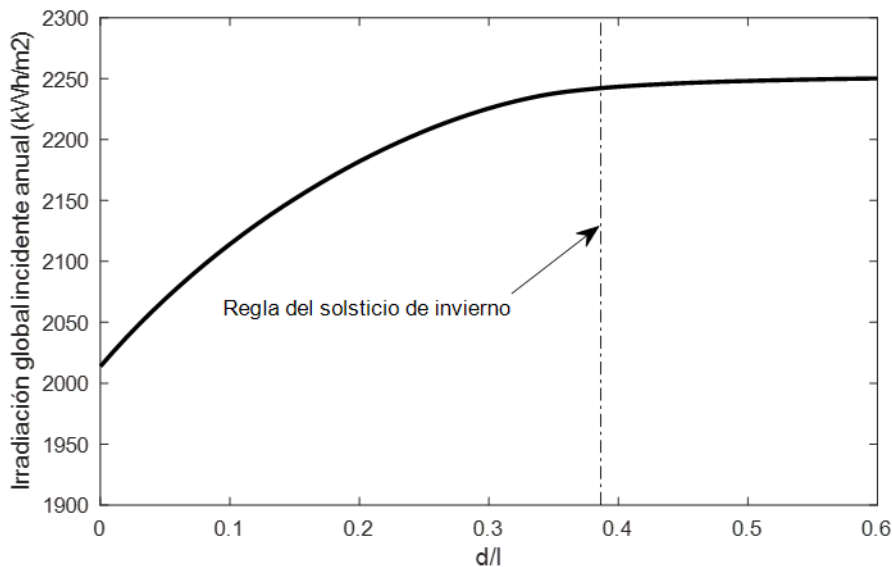


Figura 8 Irradiación global anual incidente sobre los colectores en función del parámetro de separación entre filas  $d/l$ .

En figura 8 se ha representado el comportamiento de la irradiación global anual incidente sobre los colectores a medida que se varía el espaciado entre filas, desde  $d/l=0.0$  hasta  $d/l=0.6$ . Puede apreciarse que, para filas de colectores muy juntas, la irradiación incidente decrece de manera importante. La irradiación para el caso extremo, suponiendo que no se deja pasillo libre de separación entre filas ( $d/l=0.0$ ), cae desde aproximadamente  $2,250 \text{ kWh/m}^2$  del caso ideal hasta  $2,015 \text{ kWh/m}^2$  (es decir, una reducción del 11%). Luego la distancia de separación entre colectores es un parámetro muy importante que debe ser calculado con cuidado durante la fase de diseño de las plantas. En la figura 8 se muestra también el caso de que se verifica la regla del solsticio de invierno, que como puede verse está cercano al caso ideal sin sombreado.

## **5. Conclusiones**

Se ha desarrollado un modelo que permite calcular la irradiancia bajo condiciones de autosombreado entre filas en campos de colectores solares montados sobre terreno horizontal y con filas de idéntica anchura. En este estudio se utilizaron datos climatológicos de radiación y temperatura que representan un año típico de Aguascalientes en intervalos de 10 minutos, si bien el modelo puede utilizarse para otras localizaciones con disponibilidad de datos climatológicos.

Se han realizado simulaciones configurando el modelo para plantas de colectores de pequeño-mediano tamaño con orientación sur e inclinación cercana a la óptima. Entre los resultados se ha podido verificar que, si se utiliza la regla del solsticio de invierno para calcular el espaciado entre filas, las pérdidas por sombreado se mantienen en niveles muy bajos (pérdidas del 0.54%). Sin embargo, también se ha podido simular la influencia del espaciado en las pérdidas por sombreado y se concluye que se deben diseñar con cuidado para evitar excesivas pérdidas.

Aunque no es el propósito del artículo realizar una optimización del espaciado entre filas de colectores, los resultados permiten extraer algunas conclusiones adicionales. Dependiendo de la cantidad de superficie que se tenga disponible, lo más recomendable es usar el método del solsticio de invierno u otro método de optimización más específico. Por ejemplo si se cuenta con superficie suficiente que

esté en condiciones óptimas para la aplicación del sistema de colectores (con un lado orientado completamente hacia el ecuador, la pendiente del techo sea casi cero y con un ratio de aspecto de la planta  $>1$ ) es recomendable colocar la menor cantidad de filas posibles para aprovechar el menor impacto de sombreado en la primera fila y en caso de tener de todos modos múltiples filas lo más recomendable es aumentar el espaciado entre filas para mitigar el sombreado ocasionado en los meses de invierno en las primeras y últimas horas del día. Sin embargo, no siempre se tienen este tipo de condiciones por lo que, en caso de no contar con suficiente espacio en la azotea, lo más recomendable es aumentar la superficie de captación del sistema sacrificando un poco el espaciado entre filas ya que se obtiene mayor beneficio al aumentar el número de colectores que al optimizar la separación entre ellos para lograr las pérdidas por sombreado del 0.54%.

Los autores agradecen a la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional (CGSMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de México por proporcionar los datos meteorológicos utilizados en la investigación. Pedro M. Rodrigo agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) de México por el apoyo económico como miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Awad, H., Gül, M., & Ritter, C. (2016). Solar photovoltaic optimization for comercial flat rooftops in cold regions.
- [2] Cooper, J. K., Sproul, A. B., & Bruce, A. G. (2016). A method to calculate array spacing and potential system size. *Applied energy*, 161(1), 11-23.
- [3] Elsayed, M. M., & Al-Tuki, M. A. (1991). Calculaton of shading factor for collector field. *Solar energy*, 47(6), 413-424.
- [4] Groumpos, P. P., & Khouzam, K. (1987). A generic aproach to the shadow effect of large solar power systems. *Solar Cells*, 22(1), 29-46.
- [5] Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto: Academic Press.
- [6] Maor, T., & Appelbaum, J. (2012). View factors of photovoltaic collector systems. *olar Energy*, 6(86), 1701-1708.

- [7] Rodrigo, P. M., Velázquez, R., & Fernández, E. F. (2016). DC/AC conversion efficiency of grid-connected photovoltaic inverters in central Mexico. *Solar Energy*, 139, 650-665.
- [8] Weinstock, D., & Appelbaum, J. (2004). Optimal solar field design of stationary collectors. *Journal of Solar Energy Engineering*, 126(3), 898-905.

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN EN VHDL DE UN SISTEMA DE SINCRONIZACIÓN MEDIANTE FPGA y PPS PARA REFERENCIA DE 1 ms**

*DESIGN AND IMPLEMENTATION IN VHDL OF A SYNCHRONIZATION SYSTEM USING FPGA AND PPS FOR A 1 ms REFERENCE*

**María Amparo Sánchez Magaña**

Universidad Autónoma de Querétaro  
*amparosamag@gmail.com*

**Luis Morales Velázquez**

Universidad Autónoma de Querétaro  
*lmorales@hspdigital.org*

## **Resumen**

Los lazos de seguimiento de fase (PLL) son ampliamente utilizados en materia de telecomunicaciones, redes inalámbricas y redes inteligentes como herramienta para mantener señales sincronizadas. En el presente trabajo se muestra el diseño propuesto de un lazo de seguimiento de fase completamente digital (ADPLL) utilizado como sintetizador de frecuencia. La solución desarrollada utiliza una referencia de temporización externa con alta estabilidad y a la salida obtiene una sincronización de una señal con período de 1 ms.

Al modelo clásico del ADPLL se agregaron un par de módulos digitales con la finalidad de mantener las características de estabilidad del oscilador principal. Se comprobó además que mediante la implementación de un ADPLL se disminuye el error de fase acumulativo presente en todos los osciladores de cristal. Los resultados del modelo propuesto se muestran en la sección 3, así como también se presenta la simulación para verificar su funcionamiento y comprobar las ecuaciones propuestas en la sección 2.

**Palabra(s) Clave:** ADPLL, FPGA, GPS, sincronización.

## **Abstract**

*Phase Locked Loops (PLL) are widely used in telecommunication, wireless & wire line, and intelligent networks to keep signals synchronized. This paper shows the budget design for an All Digital Phase Locked Loop used as a frequency synthesizer. The develop solution uses an external high-stability timing reference that achieves the synchronization of a 1 ms period signal.*

*Two digital modules were added to the classic ADPLL model in order to maintain the stability characteristics of the main oscillator. It was also verified that through the implementation of an ADPLL it is possible to reduce the accumulative phase error present in all crystal oscillators. The results of the budget model are shown in section 3, as well as the simulation to verify the operation and verification of the equations developed in section 2.*

**Keywords:** ADPLL, FPGA, GPS, synchronization.

## **1. Introducción**

La sincronización en tiempo es un tema de gran relevancia hoy en día y su uso se ha extendido en las redes industriales en general. Normalmente estas redes están compuestas de una gran cantidad de nodos dispersos sobre un área con la finalidad de monitorear un fenómeno de interés, sin embargo, la recolección de los datos por cada nodo debe estar apropiadamente sincronizada con el objetivo de reducir variaciones que pueden ser perjudiciales en la adquisición de datos [Al-Kofahi, 2016]. La sincronización en tiempo normalmente se basa en marcas de tiempo que son proporcionadas por equipos que cuentan con una notable precisión y estabilidad que por ende son tomadas como referencia para la secuencia correcta de eventos en un proceso [Razo, 2016].

Gracias al avance tecnológico, los sistemas de posicionamiento global nos permiten sincronizar múltiples relojes en amplias áreas geográficas de manera exacta ya que está constituido por una constelación de 24 satélites con relojes atómicos, cuyos valores cuentan con una alta estabilidad y exactitud alcanzando fluctuaciones de período que rondan por debajo de las décimas de nanosegundos [Grobler, 2006].



Dentro de las aplicaciones relacionadas a la sincronización con tiempo global se pueden destacar aquellas en mediciones de voltaje en sistemas eléctricos de alta potencia [Yao, 2018], en redes de telecomunicación digital como herramienta para agregar flexibilidad en las mismas [Shan, 2014], por mencionar algunos ; donde generalmente para el ajuste en tiempo de una red se recurre a estándares y protocolos, establecidos por la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), los cuales regulan el perfil de datos con la finalidad de cumplir con los requisitos de sincronización de tiempo [Amelot, 2010] tales como: IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP) o el Network Time Protocol (NTP). Sin embargo, en estos intervienen varios factores que no permiten que la sincronización se realice con precisión ya que a pesar del retardo de espera existen otros componentes de retardo como lo son el retardo de procesamiento y el retardo de transmisión [Hadzic, 2011]. Otra herramienta que logra proporcionar etiquetas de tiempo para las mediciones de eventos de manera uniforme son los lazos de seguimiento de fase (Phase Locked Loop, PLL) y que alcanza una alta resolución de etiquetas de tiempo, aunque requiere un tiempo de adquisición más largo para lograr una sincronización estable [Jahja, 2014].

Pese a que existen lazos de seguimiento analógicos, en el presente trabajo se describe el desarrollo de un lazo de seguimiento de fase completamente digital e implementado en FPGA cuyo detector de fase no depende de la superposición de la señal de referencia y la señal a sincronizar, sino que se pretende trabajar a partir de las comparaciones y no alineaciones de los flancos ascendentes de la señal de un pulso por segundo (Pulse Per Second, PPS) provista de un receptor GPS. Esta manera síncrona de enlazar dos señales en frecuencia y fase permite continuar generando de forma correcta la señal a sincronizar aún y cuando el receptor se encuentre trabajando bajo condiciones no habituales, es decir, que la señal PPS se haya perdido.

### **El problema de la variación de frecuencia**

En la actualidad los dispositivos electrónicos trabajan a una frecuencia nominal, la cual es proporcionada por un oscilador integrado, y que es especificada en la hoja

de datos del dispositivo. Sin embargo, en la realidad esta frecuencia no es constante, su estabilidad está ligada directamente a las condiciones de operación del dispositivo como la temperatura. Para determinar estas variaciones de frecuencia, se utiliza el término partes por millón (Parts-Per-Million, PPM), el cual se refiere a la diferencia entre la frecuencia nominal del oscilador y su frecuencia actual o real y es definido por el proveedor del oscilador [Cerde, 2014].

Para la implementación del presente proyecto se utilizó una tarjeta de desarrollo DUA 4, la cual utiliza el oscilador 535-9995-1-ND de Abracon LLC con una frecuencia nominal de 48 MHz, con una variación de frecuencia especificada de +/- 100 ppm. Las frecuencias mínimas y máximas de operación se pueden calcular mediante las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, con  $f_{nominal} = 48MHz$  y  $f_{nominal} = 48 MHz$ .

$$f_{min} = \frac{f_{nominal}}{1 + \left(\frac{valor\ ppm}{1 \times 10^6}\right)} = 47,995,200.48\ Hz \quad (1)$$

$$f_{máx} = f_{nominal} \left(1 + \frac{valor\ ppm}{1 \times 10^6}\right) = 48,004,800\ Hz \quad (2)$$

A simple vista, esta variación de frecuencia es muy pequeña y por lo tanto se supondría despreciable al no sobrepasar ni siquiera el 0.01% de error de la frecuencia nominal. Sin embargo, si se mantiene en operación continua esta deriva puede presentar errores en el rango de minutos en largos períodos de operación. Teniendo como ejemplo una señal de 1 Hz generada con un oscilador de 48 MHz trabajando únicamente a frecuencias mínimas, luego de treinta días de trabajo continuo la fluctuación total entre la señal generada y una señal de 1 Hz ideal serían  $\Delta T = 259.14\ segundos$ . O lo que es igual, la señal de 1 Hz generada por el oscilador estaría 4.31 minutos en atraso respecto a una señal ideal con la misma frecuencia.

### Lazo de seguimiento de fase

El lazo de seguimiento de fase (Phase Locked Loop, PLL) es un sistema cerrado con retroalimentación capaz de mantener una señal de salida sincronizada tanto en frecuencia como en fase en relación con una señal de referencia [Roland, 2003].

Se trata de un circuito donde se pretende que el error de fase entre la señal de referencia y la señal de salida sea cero o se mantenga constante. El diagrama a bloques de un PLL básico consiste en tres bloques.

- Un detector de fase (PD – Phase Detector)
- Un filtro de lazo (LF – Loop Filter)
- Un oscilador de voltaje controlado (VCO – Voltage Controlled Oscillator)

Aunque un divisor de frecuencia se puede agregar cuando el PLL es utilizado como sintetizador de frecuencia, como se muestra en la figura 1.

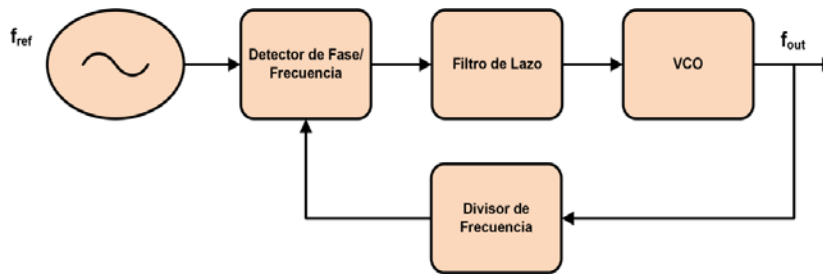


Figura 1 Diagrama general de PLL analógico.

Un detector de fase es un módulo responsable que comprara la fase de la señal de salida con la fase la señal de referencia. A la salida se obtiene una señal proporcional al error de fase  $\theta_e$ , con un rango limitado al error máximo que puede haber entre ambas señales. La salida del módulo detector de fase puede modelarse mediante la ecuación 3.

$$u_d(t) = K_d \theta_e \quad (3)$$

donde  $k_d$  representa la ganancia del detector de fase y sus unidades están dadas en volts por radianes [Roland, 2003].

La señal  $u_d$  entra a la unidad filtro de lazo el cual se encarga de filtrar las frecuencias altas que no son deseadas, ya que el filtro de lazo se encarga de dejar pasar las frecuencias bajas y de suprimir las altas, por lo que se trata prácticamente de un filtro pasa-bajas. En la mayoría de los diseños de PLL se utiliza un filtro pasa-bajas de primer orden, algunas de las versiones más comúnmente encontradas son:

- Filtro pasivo de retardo de fase.

- Filtro activo de retardo de fase.
- Filtro activo PI (Proporcional-Integral).

Un oscilador de voltaje controlado (VCO) es un tipo de oscilador controlado muy utilizado en sistemas de comunicación en el que la frecuencia de oscilación es proporcional a un voltaje de entrada. Su función es la de convertir este voltaje de entrada de corriente directa (CD) a una señal sinusoidal en la salida, es decir que la frecuencia de la señal de salida cambia cuando el voltaje de entrada varía. En los PLL se encarga de oscilar a una frecuencia cercana la frecuencia de la señal de entrada y varía su frecuencia de modo que se genere una señal que siga a la frecuencia de la señal de referencia. Los osciladores de voltaje controlado (VCO) son un tipo de oscilador controlado utilizados en variedad de aplicaciones como sistemas de comunicación y circuitos de temporización. Particularmente, los VCO's son empleados comúnmente en sistemas de control de lazo de seguimiento de fase. Se pueden considerar como circuitos que transforman una señal de voltaje de control de entrada en una señal de salida con una frecuencia deseada en el que la frecuencia de oscilación de la señal de salida es proporcional al voltaje de la señal de entrada [Roland, 2003]. Su función es la de convertir este voltaje de entrada de corriente directa (CD) a una señal sinusoidal en la salida, es decir que la frecuencia de la señal de salida cambia cuando el voltaje de entrada varía. En los PLL se encarga de oscilar a una frecuencia cercana a la frecuencia de la señal de entrada y varía su frecuencia de modo que se genere una señal que siga a la frecuencia de la señal de referencia. Los VCO's operan dentro de una banda finita de frecuencias, idealmente esta banda debe estar centrada alrededor de la frecuencia deseada, sin embargo, las variaciones inherentes del proceso limitan la precisión que se puede alcanzar al llevar a cabo el centrado de la banda de frecuencia cerca de la frecuencia que se desea [Mitchel, 2005].

## **2. Métodos**

Se ha implementado la estructura mostrada en la figura 2, la cual consta principalmente de dos módulos:

- Módulo generador PPS.
- Módulo de sincronización.

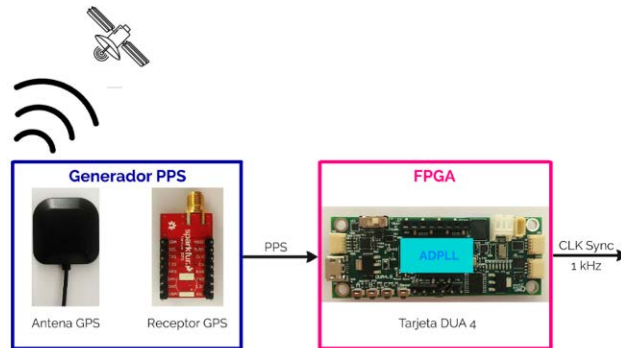


Figura 2 Esquema general de la metodología.

En el primero se encuentra la antena y el receptor GPS conectados entre ellos por medio de un conector SMA. Es importante mencionar que la antena GPS debe permanecer en todo momento en el exterior, con el fin de evitar fallas con el enlace satelital. El receptor GPS utilizado es el Venus634LPx el cual tiene a su salida una señal digital en estado lógico alto durante 4 ms a una frecuencia de 1 Hz. Esta señal es la referencia a la cual debe sincronizarse una señal generada por la tarjeta FPGA en el módulo de sincronización. Dicho módulo está constituido por un PLL completamente digital trabajando como sintetizador de frecuencia, por lo que se pretende generar una nueva señal a 1 kHz que mantenga las mismas características de estabilidad, exactitud y tolerancia del oscilador principal, logrando con esto que no se presente deriva en frecuencia ante períodos largos de operación.

La arquitectura digital propuesta del ADPLL se muestra en la figura 3, la cual consiste de un detector de flancos, un detector de fase-frecuencia, un oscilador digital controlado (DCO), un divisor de frecuencia, un contador y temporizador, además de una máquina de estados encargada de realizar la tarea de control de la estructura digital.

Como señal de entrada se tiene la señal PPS proveniente del GPS y como salida la señal CLK de 1 kHz sincronizada. La señal PPS ingresa al detector de flancos generando un pulso cada que este detecta un cambio de nivel lógico bajo a alto en

la señal de PPS. El pulso generado a partir de la señal PPS ingresa al detector de fase-frecuencia en donde se obtiene el desfase que esta señal presenta en relación con la señal generada por el divisor de frecuencia. La señal proveniente del divisor de frecuencia está constituida por un pulso de reloj a la misma frecuencia que la señal PPS generado a partir de la señal CLK. El desfase es representado por la variable K1 que sirve de valor final para el contador offset y las señales F1 y F2 indican si el desfase en la señal de 1 Hz está en adelanto o en atraso. La entrada al contador proviene del temporizador offset el cual básicamente es la base de tiempo determinada por la diferencia de tiempo entre el periodo nominal y el mínimo o máximo esperado (K2). Una vez que el contador offset llega al valor establecido la compensación se considera concluida. La máquina de estados es la encargada de realizar la acción de control además del envío y recepción de señales de inicio y conclusión a algunos de los módulos involucrados.

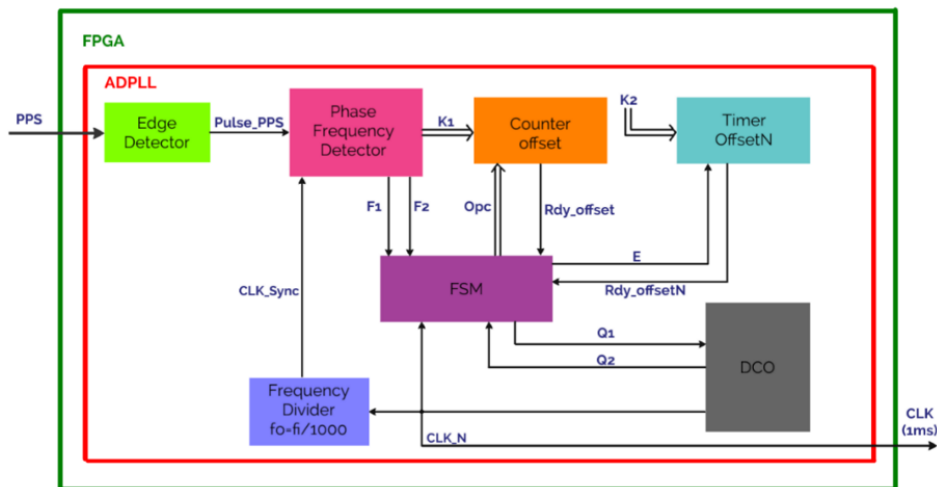


Figura 3 Diagrama a bloques ADPLL.

### Detector de flancos

Como se mencionó anteriormente, los PLLs usaban el área de superposición entre las señales de entrada y la de retroalimentación para calcular el error de fase. No obstante, dentro de las estructuras digitales síncronas es necesario detectar la transición de un estado a otro. Para este caso en particular, un detector de flancos ascendentes en la señal PPS debe ser implementado.

Dicho detector de flancos está compuesto de dos Flip Flops tipo D, una compuerta lógica NOT y una compuerta lógica AND, tal y como se muestra en la figura 4. A la salida de este bloque se tendrá un pulso en alto cuando se detecte un flanco ascendente de la entrada PPS, en caso contrario la salida se mantendrá en bajo.

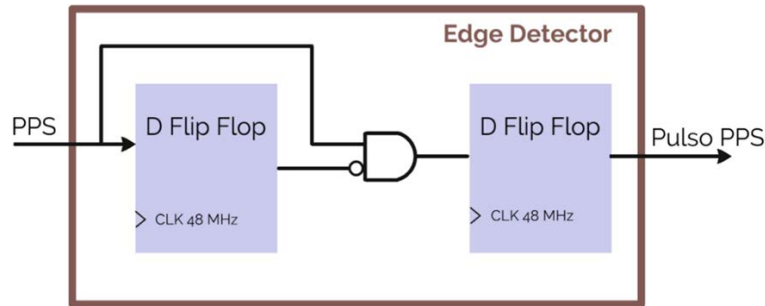


Figura 4 Diagrama a bloques, detector de flancos.

Debido a que ambos Flip Flops están conectados de manera serial, estos presentan un retardo en cada ciclo de la señal PPS proporcionada por el GPS, este retardo está dado en decenas de nanosegundos. El ángulo de fase entre la señal PPS y la señal pulso a la salida del módulo del detector de flancos está dado por la ecuación 4.

$$\varphi_{\text{detector flancos}} = \frac{2 * \pi}{2 * f_{osc}} = 2.62 \times 10^{-7} \text{ rad} \quad (4)$$

Este ángulo de fase entre ambas señales es constante y de ninguna manera se acumulará error entre ambas señales a través del tiempo.

### Detector de fase- frecuencia

En el presente proyecto se diseñó un detector de fase que comparara los flancos ascendentes de las señales pulso PPS y la señal con frecuencia de 1 Hz a sincronizar (CLK Sync). A la salida de este módulo se encuentran dos banderas, F1 y F2, las cuales indican el estado entre las dos señales a enganchar:

- CLK Sync en atraso a la señal de referencia: Un estado lógico en alto se mantendrá en F<sub>1</sub>, mientras que F<sub>2</sub> permanecerá en estado bajo.

- CLK Sync en adelanto a la señal de referencia: Un estado lógico en alto se mantendrá en  $F_2$ , mientras que  $F_1$  permanecerá en estado bajo.

Así mismo, a la salida se encuentra un número proporcional a la diferencia de tiempo entre los bordes ascendentes entre la señal de referencia entrante y la señal de retroalimentación; donde dicha cantidad se encuentra limitada a la tolerancia del oscilador de la tarjeta. Como se mencionó en el capítulo 1, el oscilador 535-9995-1-ND a utilizar indica una variación de frecuencia máxima de  $\pm 100$  ppm, la cual se pretende mantener en la señal CLK Sync. Aplicando la ecuación 1 y 2 se obtiene que, para una señal de 1 Hz, la variación de tiempo máxima entre la frecuencia nominal y la real que puede presentarse es de  $\Delta T = 1 \times 10^{-4}$  segundos.

Para obtener el valor máximo a la salida del detector de fase frecuencia es necesario hacer un escalamiento e implementar un contador; donde el factor de escalamiento es la relación entre el desfase máximo deseado y la frecuencia del oscilador principal como se muestra en la ecuación 5.

$$K_1 = f_{oscilador} \Delta T = 4800 \text{ cuentas} \quad (5)$$

esta cuenta del contador es directamente proporcional a la magnitud del error de fase, tal y como se muestra en la ecuación 6.

$$\theta_e = \frac{2K\pi(f_{PFD})}{f_{oscilador} - f_{PFD}} \quad (6)$$

Por lo que el error de fase máximo que se puede compensar manteniendo la tolerancia del oscilador principal es de  $\theta_{e(\max)} = 6.281876441 \times 10^{-4}$  rad.

### DCO (Digital Controlled Oscillator)

Este módulo es de gran importancia en el lazo de seguimiento de fase y es la parte del sistema donde se realiza la compensación en tiempo de la señal a sincronizar.

Está compuesto por un temporizador operando a la frecuencia de resolución deseada y trabaja en conjunto con la máquina de estados principal. Posee dos



entradas:  $Q_1$  y  $Q_2$ , las cuales modifican directamente la cuenta del temporizador del DCO.

En la estructura digital, un temporizador se describe como un contador de ciclos del oscilador y un comparador. El contador se encuentra activo en todo momento y cuando la cuenta actual logre alcanzar la cantidad necesaria para obtener una señal de 1 ms, un pulso en estado lógico alto (CLK\_N) se mantendrá a la salida del DCO. La cuenta del temporizador puede ser directamente modificada mediante las señales de entrada  $Q_1$  y  $Q_2$ . La entrada  $Q_1$  representa un atraso de la señal CLK Sync con referencia a la señal pulso PPS por lo que la base de tiempo del temporizador deberá disminuirse. Esto se logra aumentando la tasa de cambio a dos mientras  $Q_1$  esté en estado lógico alto.

En el caso contrario que se presente un adelanto de la señal CLK Sync con referencia a la señal pulso PPS la base de tiempo del temporizador deberá aumentarse, manteniendo la cuenta actual del temporizador mientras  $Q_2$  esté en estado lógico alto. Este principio de funcionamiento puede verse en la tabla 1. Donde cuenta(n) representa la cuenta actual en el contador del temporizador del DCO.

Tabla 1 Tabla de verdad contador del DCO.

Entradas		Cuenta (n+1)
$Q_1$	$Q_2$	
0	0	Cuenta(n)+1
0	1	Cuenta(n)
1	0	Cuenta(n)+2

### **Contador offset y temporizador offsetN**

Como se explicó en la descripción del detector de fase frecuencia, existe factor máximo para el conteo del desfase entre la señal de entrada y de retroalimentación de 1 Hz. No obstante, este factor no es el mismo para una señal con una frecuencia mil veces mayor. Se espera que la señal de 1 ms a la salida del módulo DCO cuente con las mismas características de estabilidad que el oscilador principal, es por ello por lo que un módulo extra (temporizador offsetN) es agregado al diseño.

Calculando la variación de tiempo máxima en una señal de 1 kHz con tolerancia de  $\pm 100$  ppm,  $\Delta T$  (max) =  $1 \times 10^{-7}$  segundos.

El cual corresponde a un factor de:  $K_2$  (max) =  $4.8 \approx 5$

Debido a que el factor no es un número fraccionario, se redondea hacia el entero próximo. Si bien esto nos permite lograr la compensación máxima necesaria, la tolerancia para una señal con frecuencia de 1 kHz aumentará en relación al aumento del factor en el temporizador offsetN, como se muestra en la ecuación 7.

$$PPM = \frac{1 \times 10^6 \text{ factor}}{f_{oscilador} T_{nominal}} = 104.1666667 \quad (7)$$

El módulo temporizador offsetN es un temporizador que rige la compensación en la señal de 1 kHz, mientras que el contador offset cuenta la compensación máxima en la señal de 1 Hz. La tabla de verdad del contador se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Tabla de verdad contador del contador offset.

Opc	Q(n+1)
00	Q(n)
01	Q(n)
10	Q(n)+1
11	'0'

### Divisor de frecuencia

Por último, pero no menos importante se encuentra un divisor de frecuencia, el cual, como su nombre lo indica divide la frecuencia de la señal obtenida por el DCO. Recordemos que a la salida del DCO se tiene un pulso que tiene una frecuencia equivalente a la resolución que se requiere (1 ms) y que por razones obvias no puede compararse en frecuencia con la señal pulso PPS proporcionada por el GPS. Es por esto que un divisor de frecuencia es necesario antes de ser retroalimentado al detector fase frecuencia.

La señal a la salida del DCO debe ser escalada por un factor N, demostrado en la ecuación 8, el cual controlará la frecuencia a la salida del módulo divisor de frecuencia.

$$f_{sync} = N f_{CLKN} \quad (8)$$

Para este caso en particular, una frecuencia de 1 kHz debe ser escalada a la misma frecuencia de 1 Hz del PPS por lo que  $N=1000$ .

### 3. Resultados

En una primera prueba, se pretendió conocer el comportamiento del oscilador 535-9995-1-ND de Abracon LLC. Se generó una señal de 1 Hz sin utilizar ningún método de sincronización. Dentro de las primeras muestras ambas señales presentaron un error de fase mínimo, casi despreciable. Luego de veinte minutos de operación constante, se pudo observar un desfase mayor entre las señales, alcanzando los 1.288 ms tal y como se muestra en la figura 5. El canal C1 muestra la señal generada por el FPGA mientras que la señal C2 es la señal provista por el receptor GPS. Si bien se puede concluir que el oscilador de la tarjeta se encuentra trabajando dentro de la tolerancia especificada, la deriva en el tiempo que presenta se observa como un error de fase acumulativo a lo largo del tiempo.



Figura 5 Medición de desfase entre señales sin ADPLL después 20 minutos de operación ( $\Delta T=1.2$  ms).

La prueba anterior se repitió una vez más, utilizando esta vez el módulo de sincronización diseñado. Dentro de este módulo la señal es retroalimentada con el fin de disminuir el error de fase acumulativo. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 6. Durante los veinte minutos de operación ambas señales presentaron un desfase mínimo, no acumulativo y menor a  $1 \mu\text{s}$ . Por lo tanto, el ADPLL

diseñado logra mantener enganchadas ambas señales conservando el ángulo entre ellas por debajo de la tolerancia máxima especificada.

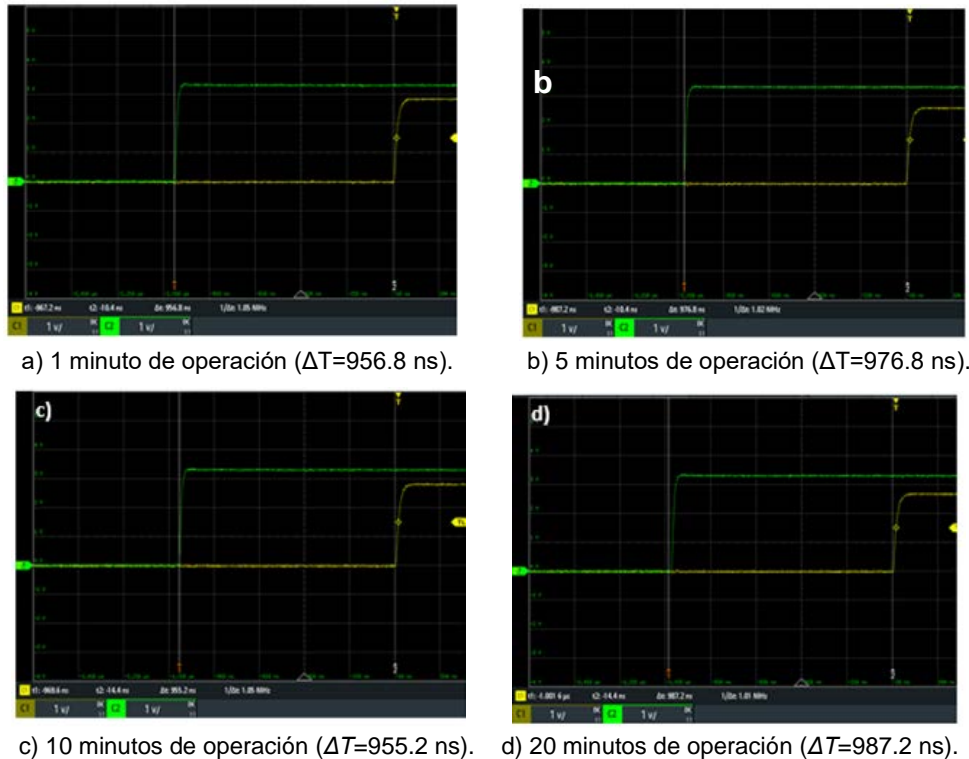


Figura 6 Medición de desfase entre señales después de

Se realizó, además, la simulación del sistema con la finalidad de observar el comportamiento en la señal de 1 kHz. Se simuló un escenario en el cual ambas señales presentarían una diferencia en su período de  $\Delta T=1.6146 \times 10^{-5}$  segundos (figura 7).



Figura 7 Desfase entre CLK Sync y Pulso PPS corresponde a  $\Delta T=1.6146 \times 10^{-5}$  segundos.

La diferencia de tiempo máxima en presente en el periodo de CLK\_N fue de  $1.04 \times 10^{-7}$  s, lo cual corresponde a una tolerancia de  $\pm 104.16$  PPM. Esta diferencia de tiempo se hace presente en cada ciclo de CLK\_N necesarios para la compensación completa de la señal de 1 Hz, tal como se puede apreciar en la figura 8.

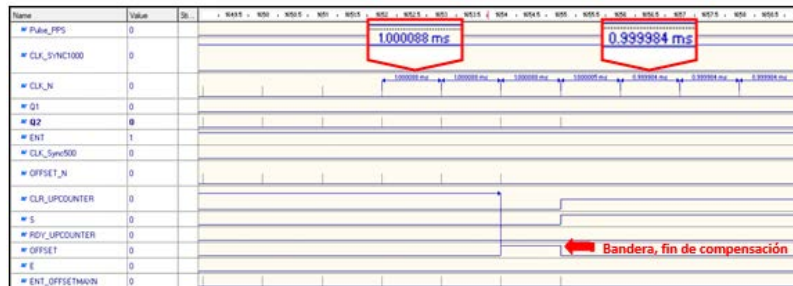


Figura 8 El período de CLK N.

El período de la señal CLK N se modifica en un valor de  $-100$  PPM cuando CLK Sync se encuentra en adelante con respecto al pulso PPS y en un valor de  $+100$  PPM cuando se encuentra en atraso. Es entonces que se deduce que la compensación no se realiza de una manera igual entre los 1000 ciclos, sino que existe una relación entre el desfase y el porcentaje del total de ciclos de CLK N que son compensados como se muestra en la ecuación 9.

$$\% \text{ ciclos compensados} = \frac{100 * \text{Desfase total}}{\Delta T_{\max(\text{res})} * (f_{\text{res}})} \quad (9)$$

Donde  $f_{\text{res}}$  es la frecuencia de resolución a la salida del DCO. Para este ejemplo donde corresponde un desfase de  $1.6146 \times 10^{-5}$  segundos el porcentaje de los ciclos compensados es del  $15.499\%$  lo cual corresponde a  $154.99$  ciclos de  $1$  ms que se observan en la figura 9.

#### 4. Discusión

A pesar de que se logra obtener una señal de  $1$  Hz trabajando bajo las mismas condiciones de estabilidad que el oscilador principal, la tolerancia en la señal generada de  $1$  kHz no pudo mantener este valor de variación. Esto se debió al

redondeo que presentó la cuenta del temporizador que rige la compensación para 1 kHz. La tolerancia tuvo que ser ajustada a un nuevo valor de  $\pm 104.16$  PPM. Esto podría corregirse utilizando un oscilador con una frecuencia múltiplo de  $\frac{1}{\Delta T}$ .

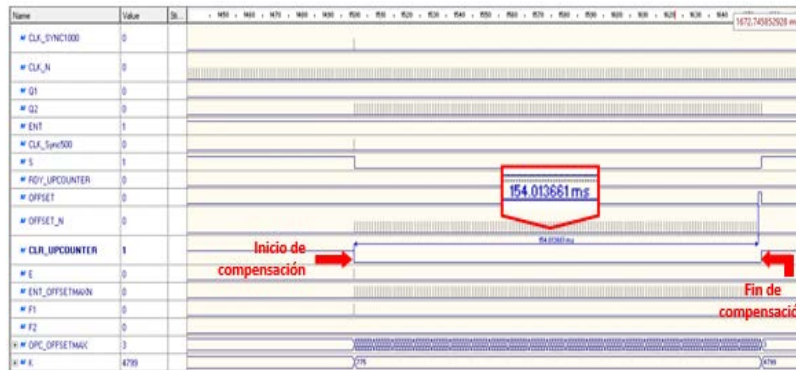


Figura 9 Duración de la compensación total.

Tal y como se mostró en los resultados, la diferencia de fase entre la señal de referencia y la de retroalimentación representa el porcentaje de ciclos de la señal de 1 kHz que serán compensados la cantidad de  $\Delta T_{\max(1 \text{ kHz})}$ . A pesar de que esta compensación mantiene a dicha señal dentro de los límites de tolerancia y estabilidad esperados, nuestro diseño podría mejorarse dividiendo la compensación total entre cada uno de los ciclos de CLK N.

## 5. Conclusiones

Se diseñó un lazo de seguimiento de fase completamente digital que permite sincronizar una señal de 1 Hz generada por el FPGA con una señal de poca fluctuación provista por un módulo GPS.

Gracias al diseño propuesto, este módulo de sincronización trabaja a partir de los flancos ascendentes de las señales a sincronizar; por lo que, si el GPS perdiera la conexión satelital, el ADPLL no realiza compensaciones innecesarias que podrían llegar a afectar la estabilidad del reloj generado.

La señal de 1 Hz obtenida muestra poca derivación en el tiempo y mantiene un bajo error de fase incluso en largos períodos de tiempo.

Además, en la implementación mostró una tolerancia considerablemente menor a la esperada. Se generó una señal con una frecuencia 1000 veces mayor a la señal de referencia. Sin embargo, debido al redondeo en el factor del temporizador para generar dicha señal la tolerancia en la señal de 1 KHz aumentó un 4.16%.

Debido a que el factor en el temporizador de 1 Hz es una cantidad fija, la compensación en esta señal no se realiza de manera uniforme dentro de los N ciclos, sino que el error entre la señal generada y la señal de referencia de 1 Hz representa el porcentaje de ciclos a los cuales se les asignará el 100% de la compensación.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Al-Kofahi, O., Evaluating time synchronization using application-layer time-stamping, 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, pp. 1-6, 2016.
- [2] Amelot, J., Fletcher, J., Anand, D., Vasseur, C., Li-Babound, Y. S. and Moyne, J., An IEEE 1588-time synchronization testbench for assesing power distribution requirements, 2010 IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measuments, Control and Communication, Portsmouth, NH, pp. 13-18, 2010.
- [3] Calderón Zavala, G., Mina Antonio, J. D., López Núñez, A. R. and Martínez Flores, L. R., Modelado de un generador de SAGS basado en un convertidor back to back, 2015 SENIE.
- [4] Grobler, M. and Naidoo, R., Determining Transmission Line Parameters from GPS Time-Stamped Data, IECON 2006 - 32<sup>nd</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Paris, pp. 3580-3584, 2006.
- [5] Hadzic, I., Morgan, D. R., and Sayeed, Z., A Synchronization Algorithm for Packet MANs, in IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 4, pp. 1142-1153, April 2011.
- [6] Razo-Hernandez, J. R., Valtierra-Rodriguez, M., Lieberman, D. G., Amezcua-Sanchez J. P., Morales-Hernandez, L. A. and Dominguez-Gonzalez, A. IRIG-B decoder based on FPGA for synchronization in PMUs

- by considering different formats, 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, pp.1-6, 2016.
- [7] Jahja, R. H., Dahal, S., Suk-seung, H., Goo-Rak, K., Pyun, J. Y. and Shin, S. Improving IEEE 1588v2 time synchronization performance with phase locked loop, 2014 48<sup>th</sup> Asilomar Conference of Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, pp. 252-257, 2014.
- [8] M. Cerda, Ramón. Understanding Quartz Crystals and Oscillators, Editorial Artech House, 2014.
- [9] P. Mitchel, Eric, R. Gehring, Mark. Voltage Controlled Oscillator, United States Patent, 2005.
- [10] Roland E. Best, Phase Locked Loops. Design, Simulation and Applications, Quinta edición, McGraw-Hill, 2003.
- [11] Shan, Q., Jun, Y., Le Floch, J. M., Fan, Y., Ivanov, E. N. and Tobar, M. E., Simulating GPS radio signal to synchronize network – a new technique for redundant timing, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 61, no. 7, pp. 1075-1085, July 2014.
- [12] Yao, W., Lu, H., Till, M. J., Gao, W. and Liu, Y., Synchronized Wireless Measurement of High-Voltage Power System Frequency Using Mobile Embedded Systems, in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 3, pp. 2775-2784, March 2018.



# TITANIUM FRAMEWORK PARA AUTOMATIZACIÓN DE PRUEBAS DE SOFTWARE

## TITANIUM FRAMEWORK FOR SOFTWARE TESTING AUTOMATION

**Gilberto Sánchez Mares**

Titanium Solutions

*gilberto.sanchez@titaniumsolutions.org*

### Resumen

La automatización de pruebas de software consiste en utilizar herramientas y estrategias para reducir la intervención o interacción humana en tareas redundantes, repetitivas o complejas. Esta automatización se ve reflejada en scripts de pruebas. Para poder simplificar aún más el tiempo de diseño y ejecución de dichos scripts se han desarrollado los frameworks, que son un conjunto de suposiciones, conceptos y prácticas. Se desarrolló un framework llamado "Titanium", para automatizar pruebas en plataformas web; se programó en Java y la intención principal es que se pueda difundir, utilizar y mejorar. Las principales ventajas son: puede ser utilizado por ingenieros de pruebas que tengan conocimientos técnicos o aquellos que no los tengan, es de fácil implementación, con un tiempo de aprendizaje muy corto y reduce costos en las tareas de pruebas.

**Palabras Claves:** Automatización de Pruebas, framework, pruebas de software, WebDriver.

### Abstract

*Automated testing consists of using tools and strategies to reduce human intervention or interaction in redundant, repetitive or complex tasks. This automation is reflected in scripts.*

*To further simplify the design and execution time of these scripts, frameworks have been developed, which are a set of assumptions, concepts and practices.*

*A framework called "Titanium" was developed to automate tests on web platforms; It was programmed in Java and the main intention is that it can be disseminated,*

*used and improved. The main advantages are: it can be used by test engineers who have technical knowledge or those who do not have them, it is easy to implement, very short learning time and it reduces costs in testing tasks.*

**Keywords:** *Automation testing, framework, software testing, WebDriver.*

## **1. Introducción**

El avance de las herramientas de desarrollo de software ha ayudado a que los desarrolladores diseñen aplicaciones más complejas (añadiendo o modificando procesos) reduciendo así el tiempo de creación de productos, sin embargo, la inseguridad que produce la calidad final del software incrementa, esto debido a que los ingenieros de pruebas tienen también un tiempo reducido para poder implementar de la mejor forma las pruebas necesarias.

Para asegurar un nivel de calidad antes de lanzar un prototipo de un software, es recomendable recurrir a la automatización de ciertas pruebas funcionales que aporten mayor confiabilidad sobre las principales funcionalidades del producto [J. Hui, 2008].

Según P. Laukkanen, la automatización de pruebas de software consiste en utilizar herramientas y estrategias para reducir la intervención o interacción humana en tareas redundantes, repetitivas o complejas. Esta automatización se ve reflejada en scripts (o por su traducción al español “secuencias de comandos”) con los que se puede aumentar de forma drástica la capacidad de probar el software, esto en lo que respecta a pruebas de regresión antes y después de la publicación de un prototipo [Guru99, 2018], [Laukkanen, 2006].

### **Frameworks en automatización de pruebas**

Un framework (o marco de trabajo por su traducción al español) de automatización de pruebas es un conjunto de suposiciones, conceptos y prácticas que proporcionan apoyo a las pruebas de software automatizado [Guru99, 2018]. Estos framework integran las bibliotecas de funciones, fuentes de datos de prueba, detalles de objetos y diversos módulos reutilizables. Los componentes actúan como pequeños bloques de construcción que deben ser ensamblados para

representar un proceso de negocio. El framework proporciona la base de la automatización de pruebas y simplifica el esfuerzo [Fewster, 2001], [Laukkanen, 2006].

La principal ventaja de los frameworks que proporcionan apoyo a las pruebas de software automatizado es el bajo costo de mantenimiento. Por ejemplo, si hay cambio en los datos de un caso de prueba, entonces sólo el archivo donde se encuentran los datos debe ser actualizado y los scripts seguirán siendo los mismos.

## **Selenium**

Para poder entender que es Selenium, se debe tomar la definición traducida, tomada de la página principal de SeleniumHQ [Kent, 2007], [Garg, 2014]: *“Selenium automatiza los navegadores. ¡Eso es! Lo que hagas con ese poder depende de ti. Principalmente, es para la automatización de aplicaciones web con fines de pruebas, pero ciertamente no se limita a eso. Las tareas aburridas de administración basadas en web pueden (¡y deben!) ser automatizadas.”* Una definición muy concreta y directa, pero vamos a ampliar un poco más la definición. Selenium es un set de herramientas de código abierto, que ayuda a automatizar acciones que un usuario puede realizar sobre aplicaciones web. Cada herramienta dentro del set tiene un enfoque diferente para apoyar el proceso de automatización de pruebas.

Los cuatro componentes de Selenium (figura 1) son:

- *IDE*: Se implementa como una extensión de Firefox, y permite grabar, editar y depurar pruebas. Se recomienda su uso para prototipos de pruebas, debido a que no es capaz de generar ciclos ni condiciones.
- *RC*: Esta es la primera herramienta de prueba web automatizada que permite a los usuarios utilizar un lenguaje de programación que prefieran.
- *WebDriver*: Implementa un enfoque más moderno y estable en la automatización de las acciones del navegador. WebDriver, a diferencia de RC, no se basa en JavaScript para Automatización. Controla el navegador comunicándose directamente.

- **Grid:** Se especializan en ejecutar múltiples pruebas a través de diferentes navegadores, sistemas operativos y máquinas. Puede conectarse con RC especificando el navegador, la versión del navegador y el sistema operativo. Hay dos elementos principales: hub y nodos.



Figura 1 Selenium suite.

Entre todas las herramientas Open Source, Selenium se considera un framework de pruebas de software altamente portátil y una de las mejores herramientas disponibles en el mercado actual para la automatización de aplicaciones web.

### Selenium WebDriver

WebDriver es un framework de automatización web que permite ejecutar casos de prueba sobre diferentes navegadores (figura 2).



Figura 2 Ejemplos de navegadores soportados.

Debido a que es posible utilizar lenguajes de programación para la creación de scripts de automatización de pruebas, se pueden utilizar operaciones condicionales y bucles. Algunos de los lenguajes soportados son:

- Java
- C#
- Python
- Ruby
- PHP
- JavaScript

### Arquitectura de WebDriver

A primera vista puede parecer que Selenium está manejando el navegador directamente desde el código, sin embargo, este proceso es un poco más complejo de lo que pareciera. La arquitectura de WebDriver está dividida en tres partes principales: **Lenguaje de vinculación, WebDriver Application Programming Interface (API)** y **Drivers** (figura 3).

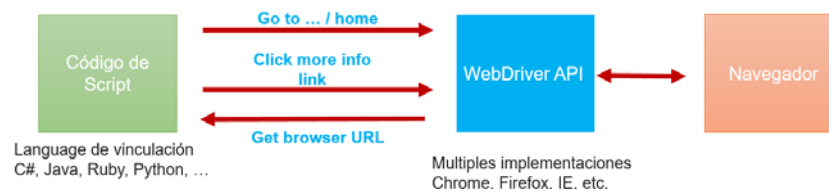


Figura 3 Arquitectura WebDriver.

Para ver cómo es que interactúan las partes entre sí, se puede basar en que se ha escrito un script de prueba usando Java (lenguaje de vinculación) para comunicarse con la API de Selenium, el código generado va a emitir comandos a través del *WebDriver wire protocol*, el cual es un servicio *Representational State Transfer* (Rest) capaz de interpretar dichos comandos. El driver es un ejecutable que básicamente escucha en un puerto de la máquina local cuando se ejecutan las pruebas y espera que los comandos entren. Una vez que comandos son captados por driver, son interpretados y ejecutados sobre navegador [Garg, 2014].

### Ventajas y desventajas de WebDriver sobre otras herramientas

En tabla 1 se pueden encontrar ventajas y desventajas sobre otras herramientas automatizadas muy populares en el mercado [Garg, 2014], [IBM, 2017].

Tabla 1 Selenium WebDriver vs otras herramientas.

Característica	Selenium	IBM RFT	UFT
Lenguaje de scripting	Java, C#, Ruby, Python, Perl, JavaScript, PHP	Java y C#	VB Scripting
Tecnologías soportadas	Todas las tecnologías web	HTML, Java, AWT, SWT, Dojo	HTML, Java, .Net, WPF, SAP, Oracle
Soporte a navegadores	Internet Explorer, Chrome, Firefox, Safari, Opera	Internet Explorer, Chrome, Firefox	Internet Explorer, Chrome, Firefox
Soporte de Ambientes	Windows, Linux, OS X	Windows y Linux	Sólo Windows
Soporte Móvil	Sí	Sí	Sí
Manejo de Repositorio de objeto	Bueno	Muy bueno	Excelente
¿Su uso tiene un costo?	No	Sí	Sí
Opción de Record & Play	Disponible	Disponible	Disponible
Depuración	Depende del IDE	Muy bueno	Excelente
Soporte de Frameworks	Data Driven, Keyword Driven, Modularity, Test Library Architecture e Híbrido	Data Driven, Keyword Driven, Modularity e Híbrido	Data Driven, Keyword Driven, Modularity, Test Library Architecture e Híbrido
Continuous Integration	Posible usando Jenkins/ Hudson/ Cruise Control/ etc	Posible con Jenkins	Posible con ALM o Jenkins
Mecanismo de Reporte	No tiene un mecanismo integrado	Mecanismo integrado	Mecanismo integrado
Soporte	Comunidad Open Source	Soporte de IBM	Soporte de HP

## 2. Métodos

Titanium es un framework híbrido, que nace de la combinación de los frameworks: *Data-Driven Testing* (o pruebas dirigidas por datos, por su traducción al español) y *Keyword-Driven Testing* (pruebas dirigidas por palabras clave por su traducción al español). Además, se utilizó el patrón de diseño *Page Object Model* (o modelo de objetos de página), los cuales se explican a continuación:

### Data-driven testing

Mientras que la lógica del caso de prueba reside en los scripts de prueba, los datos de prueba son separados y se mantienen fuera de dichos scripts. Los datos son leídos desde archivos externos (Excel, texto, CVS, bases de datos, objetos de

accesos de datos, etc.) y son cargados en variables [Guru99, 2018], [Laukkanen, 2006]. Dichas variables son usadas tanto como datos de entrada como datos de salida (verificación de valores). En Data-Driven Testing, se propone una mejor organización de los scripts de prueba y de esta manera reducir los costos de mantenimiento de éstos. Permite que tanto los datos de entrada y los resultados esperados puedan ser almacenados juntos y por separado de la secuencia de comandos en sí [Bahaggan, 2009]. La figura 4 ilustra el marco de trabajo.

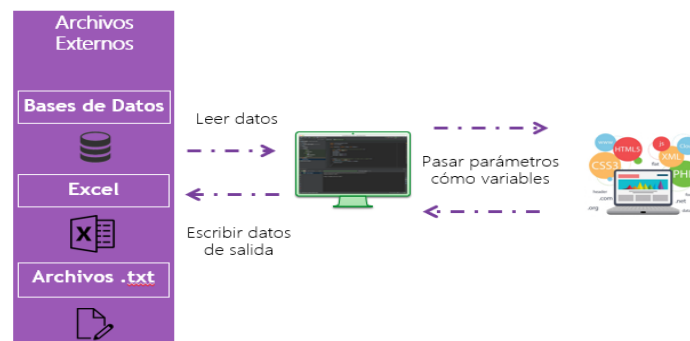


Figura 4 Funcionamiento de Data-Driven Testing.

### Keyword-driven testing

Este framework requiere del desarrollo de tablas de datos y palabras clave, independientemente de la herramienta de automatización de pruebas utilizada para ejecutarlos [Guru99, 2018]. Las pruebas pueden ser diseñadas con o sin la aplicación. En una prueba dirigida por palabra clave, la funcionalidad de la aplicación bajo prueba se documenta en una tabla, así como en el paso a paso las instrucciones para cada prueba. También es desarrollado para ofrecer un enfoque más fácil de pruebas funcionales y de Pruebas de Procesos de Negocio pasando los parámetros adecuados para particulares palabras de acción en el marco. Este marco permite pruebas razonablemente intuitivas para ser desarrolladas y ejecutadas sin necesidad de modificar los scripts de prueba [Laukkanen, 2006], [Bahaggan, 2009].

Hay 3 componentes básicos en este framework: palabra clave, mapa de aplicaciones, función de componentes. La figura 5 ilustra el proceso para crear este framework.

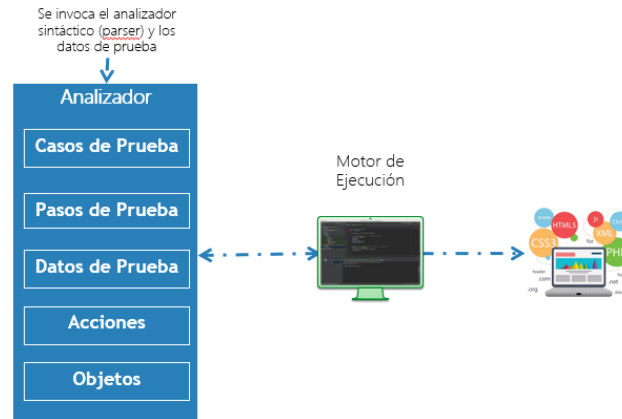


Figura 5 Funcionamiento de Keyword-Driven Testing.

### Page object model

En esencia, Page Object modela la aplicación web y sirve como interfaz para las acciones que se pueden realizar y los datos que se pueden recuperar de ella. En su forma más simple y tradicional, un objeto de página es solo una colección de funciones comunes a una página web para evitar que se repita. Si bien esto suele ocurrir cuando la comprensión del patrón de diseño del objeto de página finaliza para muchas implementaciones, es donde simplemente comienza para el objeto de página [Zylberman, 2010]. En la figura 6 se muestra la estructura de este patrón de diseño.

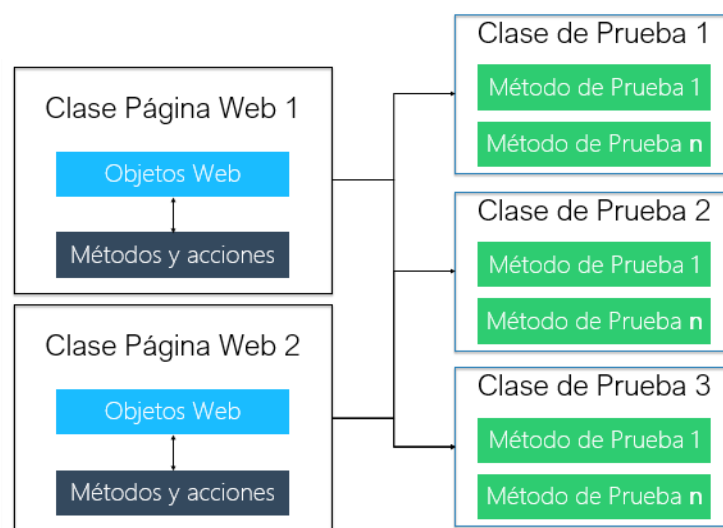


Figura 6 Estructura de Page Object Model.



## Arquitectura de titanium

El flujo inicia dentro de la clase DriverScript.java, donde se encuentra el motor que leerá archivos y clases externas, además se cuenta con un archivo en Excel nombrado *DataEngine.xlsx*, el cual sirve como analizador sintáctico que contiene los casos de prueba y sus respectivos pasos, así como los objetos web obtenidos de la aplicación.

La clase ActionKeyword.java, contiene todos los métodos para interactuar con los objetos web, cómo lo es hacer un clic, escribir sobre una caja de texto, seleccionar un elemento en una lista desplegable, etc. En total, hasta el momento se han diseñado 73 métodos. El framework es capaz de generar video de la ejecución, capturas de pantalla en errores (pero no limitado sólo a estos, se puede capturar pantalla en cualquier momento), registros de los pasos ejecutados (en consola y archivo) y un reporte HTML con los resultados de la ejecución.

La ejecución de los casos de prueba se puede ejecutar en cualquier entorno de desarrollo integrado (IntelliJ, Eclipse, NetBeans, etc.), y puede ser ejecutado utilizando Maven. La arquitectura se muestra en la figura 7.

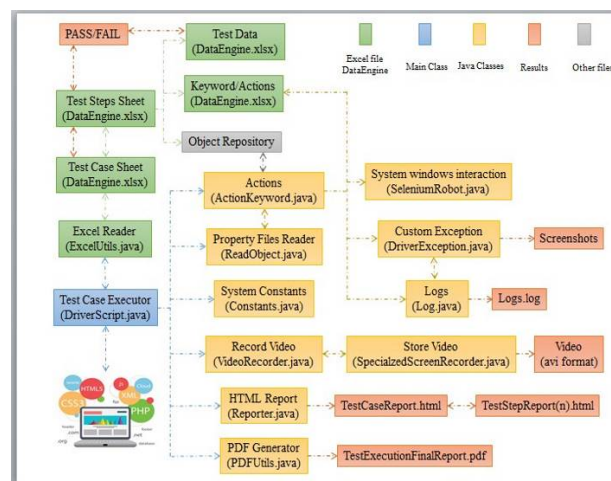


Figura 7 Arquitectura del framework titanium.

## Estructura del proyecto

El proyecto principal contiene cuatro directorios:

- Config: Contiene las clases donde se almacenan las constantes, así como clases que ayudan a leer archivos y generar video.

- Engine: Cuenta con la clase que ejecuta los casos de prueba que se encuentran en el analizador sintáctico.
- Properties: En este directorio se almacenan todos los modelos.
- Utils: Se encuentran las clases que ejecutan las acciones que se realizarán sobre los objetos web, captura de excepciones, toma de capturas de pantalla y clase que se encarga de abrir los navegadores dependiendo del navegador y el sistema operativo.

En la figura 8 se puede apreciar la estructura completa del proyecto.

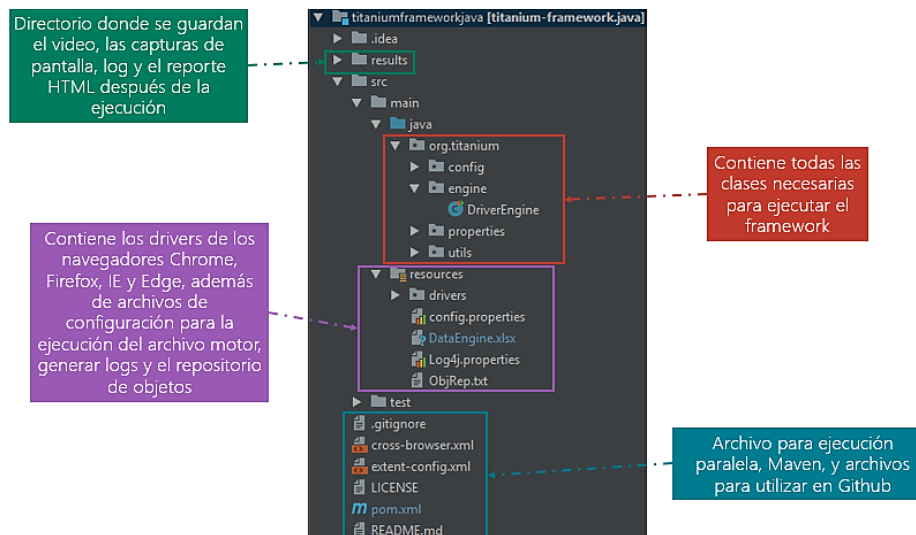


Figura 8 Estructura del proyecto titanium.

### Archivo de configuración

En este archivo se puede indicar si se quiere abrir el video, los logs, el reporte HTML y el archivo *DataEngine.xlsx* inmediatamente después de la ejecución de los casos de prueba, así como indicar a que correo se quiere enviar algún error que haya surgido de la ejecución (figura 9).

### Data-engine

En este archivo contiene cuatro hojas de alta relevancia para el proyecto, la hoja de los *casos de prueba*, los *pasos de prueba*, las *páginas* y las *configuraciones*, además de que se puede agregar una hoja con datos de prueba.

```
#Open Video, Logs and HTML results
Open_Video=false
Open_Report=false
Open_Logs=false
Open_DataEngine=false

#DataEngine name file
DataEngine=DataEngine.xlsx

#If you need external data you can create your Test Data paths
#DDT_WorkBook=C:/yourpath/TestData.xlsx
#DDT_Sheet=Test Data

#Object Repository Path
ObjectRepository=C:/Users/yourname/.vscode/extensions/titaniumframeworkjava/src/main/resources/ObjRep.txt

#Email info
SendEmail=false
Host=smtp.gmail.com
SMTPPort=587
From=titaniumoltest@gmail.com
Password=titanium619
To=titaniumoltest@gmail.com
```

Figura 9 Ejemplo de archivo de configuración.

La hoja de casos de prueba contiene seis columnas (figura 10):

- ID: Número único de identificación del caso de prueba.
- Test Case ID: Código alfanumérico de identificación del caso de prueba.
- Description: Breve descripción de lo que hace el caso de prueba.
- Run: Se indica si se quiere ejecutar el caso de prueba o no.
- DDT Sheet: Se le debe indicar el nombre de la hoja de datos en la cual se encuentran los datos de prueba.
- Result: Se imprime el resultado de la ejecución.

En la hoja de pasos de prueba, existen ocho columnas (figura 11):

- Test Case ID: Código alfanumérico de identificación del caso de prueba.
- TS\_ID: Código alfanumérico identificador de cada paso.
- Description: Descripción de cada paso de prueba.
- Page Name: Nombre de la página donde se encuentran nuestros objetos.
- Page Object: Alias del objeto, con el cual se identificará para realizar una acción sobre éste.
- Action Keyword: Acción a realizar sobre el objeto web.
- Data Set: Datos de prueba necesarios para el paso de prueba.
- Result: Se imprime el resultado de la ejecución.

En la hoja de páginas, se mapea cada objeto web con su respectiva página, tal y como se muestra en la figura 12 Hoja para almacenar páginas usando Page Object

Model. En configuración se encuentran todas las acciones, ya que el framework se puede aumentar y/o mejorar, se pueden agregar más acciones necesarias para cada proyecto. Por último, es posible iterar utilizando diferentes datos, para ello se puede crear una hoja de datos de prueba, sólo hay que recordar utilizar el mismo nombre de parámetro dentro de cada paso de prueba y la hoja de datos de prueba (figura 13).

	A	B	C	D	E
	Test Case ID	Description	Run	DDT Sheet	Result
1	LogInStoreApp_01	LogIn in to the Online Store Application	Yes		
2	LogInStoreApp_02	Invalid LogIn in to the Online Store Application	Yes	Login Data	
3	LogInStoreApp_03	Invalid URL	No		

Figura 10 Hoja de casos.

A	B	C	D	E	F	G	H
Test Case ID	TS_ID	Description	Page Name	Page Object	Action Keyword	Data Set	Result
LogInStoreApp_01	1	Navigate to website			navigate	<a href="http://www.store.demoqa.com">http://www.store.demoqa.com</a>	
LogInStoreApp_01	2	Move to Element My Account button on the Top Right location	Store_Home_Page	btn_MyAccount	moveToElement		
LogInStoreApp_01	3	Click and hold on My Account button on the Top Right location	Store_Home_Page	btn_MyAccount	clickAndHold		
LogInStoreApp_01	4	Release My Account button on the Top Right location	Store_Home_Page	btn_MyAccount	release		
LogInStoreApp_01	5	Enter the Username in the UserName field	Store_Login_Page	txtbx_UserName	input	tiempouser	
LogInStoreApp_01	6	Enter the Password in the Password field	Store_Login_Page	txtbx_Password	input	RHJEzDXX#ZShqBxY	
LogInStoreApp_01	7	Click on Login button	Store_Login_Page	btn_Login	click		
LogInStoreApp_01	8	Wait for Some time			waitFor	5	
LogInStoreApp_01	9	Click on LogOut button	Store_Home_Page	btn_LogOut	click		
LogInStoreApp_01	10	Wait for Some time			waitFor	5	
LogInStoreApp_02	1	Navigate to website			navigate	<a href="http://www.store.demoqa.com">http://www.store.demoqa.com</a>	
LogInStoreApp_02	2	Click on My Account button on the Top Right location	Store_Home_Page	btn_MyAccount	click		
LogInStoreApp_02	3	Enter the Username in the UserName field	Store_Login_Page	txtbx_UserName	input	UserName	
LogInStoreApp_02	4	Enter the Password in the Password field	Store_Login_Page	txtbx_Password	input	PassWord	
LogInStoreApp_02	5	Click on Login button	Store_Login_Page	btn_Login	click		
LogInStoreApp_02	6	Wait for Some time	Store_Login_Page	lbl_Error	waitForElementVisible		
LogInStoreApp_02	7	Verify Label Error	Store_Login_Page	lbl_Error	getElementText	Expected	
LogInStoreApp_03	1	Navigate to website			navigate	<a href="http://www.store.demoqa.com">http://www.store.demoqa.com</a>	
LogInStoreApp_03	2	Move to Element My Account button on the Top Right location	Store_Home_Page	btn_MyAccount	moveToElement		

Figura 11 Hoja de pasos.

	A	B	C
	Page Name	Gmail_Login_Page	Gmail_Home_Page
1			
2	Gmail_Login_Page	txtbx_EmailAddress	btn_Redactar
3	Gmail_Home_Page	btn_Next	txtbx_To
4		lbl_EmailDisplay	txtbx_Subject
5		txtbx_Password	txtbx_EmailBody
6		btn_SignUp	btn_SendMail
7			lnk_Inbox
8			hw_InboxTray
9			lbl_InboxFirstItem
10			lbl_AcctOpt
11			btn_SignOut

Figura 12 Hoja para almacenar páginas.

Data Set		
<a href="http://www.store.demoga.com">http://www.store.demoga.com</a>		
UserName		
PassWord		
Expected		

A	B	C
UserName	PassWord	Expected
testuser_selen_training1		ERROR: The password field is empty.
	QiiFzliqLIRY	ERROR: The username field is empty.
testuser_selen_training12	QiiFzliqLIRY	ERROR: Invalid login credentials.
		Please enter your username and password.

Figura 13 Hoja de datos de prueba.

### Repositorio de objetos

En el repositorio de objetos (figura 14) se tiene el mapeo de los objetos que se encuentran en la columna de *Page Object* de la hoja de pasos de prueba, se deben localizar los elementos de la forma que está permitida con Selenium, por medio de: *Id*, *xpath*, *css selector*, *name*, *class*, *texto de link*, *texto parcial del link* o *tag*.

```

#***** Home Page *****
btn_MyAccount=//a[@title='My Account']
btn_LogOut=//a[@title='Logout']

#***** Login Page *****
txtbx_UserName=log
txtbx_Password=pwd
btn_LogIn=login
lbl_Error=//p[@class='response'] [1]
    
```

Figura 14 Ejemplo de repositorio de objetos.

### 3. Resultados

Una vez ejecutado el framework, se generan video, reporte HTML, registros y se imprimen los resultados en el archivo DataEngine.xlsx. También se puede enviar un correo indicando si algo funcionó mal o si terminó la ejecución de forma correcta.

### Registros

Los registros muestran de forma detallada (fecha y hora), cuál fue la acción que se ejecutó, en el caso de que falle, se indica que línea de código indicó ese error

y cuál es la excepción obtenida (figura 15). Los registros se pueden visualizar en el entorno de desarrollo integrado en el que se esté trabajando, así mismo como en un archivo con extensión .log.

```

2016-12-27 09:55:46,971 INFO [LOG] Navigating to URL: http://www.store.demoqa.com
2016-12-27 09:55:51,805 INFO [LOG] Clicking on Webelement btn_MyAccount
2016-12-27 09:55:54,030 INFO [LOG] Entering the text: testuser_selen_training12 in txtbx_UserName
2016-12-27 09:55:59,132 INFO [LOG] Entering the text: QlIFzliqLIRY in txtbx_Password
2016-12-27 09:56:01,039 INFO [LOG] Clicking on Webelement btn_LogIn
2016-12-27 09:56:03,127 INFO [LOG] Waiting for element: lbl_Error
2016-12-27 09:56:08,341 INFO [LOG] ERROR: Invalid login credentials. is equal to: ERROR: Invalid login credentials.
2016-12-27 09:56:08,923 INFO [LOG] Navigating to URL: http://www.store.demoqa.com
2016-12-27 09:56:14,021 INFO [LOG] Clicking on Webelement btn_MyAccount
2016-12-27 09:56:18,971 INFO [LOG] Entering the text: in txtbx_UserName
2016-12-27 09:56:20,942 INFO [LOG] Entering the text: in txtbx_Password
2016-12-27 09:56:23,518 INFO [LOG] Clicking on Webelement btn_LogIn
2016-12-27 09:56:26,184 INFO [LOG] Waiting for element: lbl_Error
2016-12-27 09:56:29,416 INFO [LOG] Please enter your username and password. is equal to: Please enter your username and p
2016-12-27 09:56:30,301 INFO [LOG] Navigating to URL: http://www.store.demoqa.com
2016-12-27 09:56:35,434 INFO [LOG] Moving mouse to Element btn_MyAccount
2016-12-27 09:56:36,052 ERROR [LOG] Class ActionKeywords | Method findElement | Exception desc: Can not find the element.
com.gsm.utility.DriverException: Class ActionKeywords | Method findElement | Exception desc: Can not find the element.
at com.gsm.config.ActionKeywords.returnElementTagName(ActionKeywords.java:1848)
at com.gsm.config.ActionKeywords.returnElementLinkText(ActionKeywords.java:1838)
at com.gsm.config.ActionKeywords.returnElementClassname(ActionKeywords.java:1820)
    
```

Figura 15 Ejemplo de archivo de registros.

### Resultados en el archivo de Excel

Una vez finalizada la ejecución, dentro del archivo *DataEngine.xlsx*, se imprime si la ejecución del caso de prueba fue exitosa o falló (figura 16), si cada paso de prueba se ejecutó correctamente o no. En caso de tener que iterar, se indica si cada iteración se ejecutó de forma correcta o hubo algún error en el proceso.

A	B	C	D	E
Test Case ID	Description	Run	DDT Sheet	Result
LogInStoreApp_01	LogIn in to the Online Store Application	Yes		PASS
LogInStoreApp_02	Invalid LogIn in to the Online Store Application	Yes	Login Data	PASS
LogInStoreApp_03	Invalid URL	Yes		FAIL

A	B	C	D	E	F	G	H
Test Case ID	TX_ID	Description	Page Name	Page Object	Action Keyword	Data Set	Result
LogInStoreApp_01	1	Navigate to website			navigate	http://www.store.demoqa.com	PASS
LogInStoreApp_01	2	Click on My Account button on the Top right location	store_home_Page	btn_MyAccount	moveToElement		PASS
LogInStoreApp_01	3	Click and hold on My Account button on the Top right location	store_home_Page	btn_MyAccount	clickAndHold		PASS
LogInStoreApp_01	4	Release My Account button on the Top right location	store_home_Page	btn_MyAccount	release		PASS
LogInStoreApp_01	5	Enter the Username in the Username Field	store_Login_Page	txtbx_UserName	input	testuser	PASS
LogInStoreApp_01	6	Enter the Password in the Password Field	store_Login_Page	txtbx_Password	input	QlIFzliqLIRY	PASS
LogInStoreApp_01	7	Click on Login button	store_Login_Page	btn_Login	click		PASS
LogInStoreApp_01	8	Wait for some time			waitFor	5	PASS
LogInStoreApp_01	9	Click on LogOut button	store_home_Page	btn_LogOut	click		PASS
LogInStoreApp_01	10	Wait for some time			waitFor	5	PASS
LogInStoreApp_02	1	Navigate to website			navigate	http://www.store.demoqa.com	PASS
LogInStoreApp_02	2	Click on My Account button on the Top right location	store_home_Page	btn_MyAccount	click		PASS
LogInStoreApp_02	3	Enter the Username in the Username Field	store_Login_Page	txtbx_UserName	input	UserName	PASS
LogInStoreApp_02	4	Enter the Password in the Password Field	store_Login_Page	txtbx_Password	input	PassWord	PASS
LogInStoreApp_02	5	Click on Login button	store_Login_Page	btn_Login	click		PASS
LogInStoreApp_02	6	Wait for some time	store_Login_Page	lbl_Error	waitForElementVisible		PASS
LogInStoreApp_02	7	Verify label text	store_Login_Page	lbl_Error	getText	Expected	PASS
LogInStoreApp_03	1	Navigate to website			navigate	http://www.store.demoqa.com	PASS
LogInStoreApp_03	2	Move to Element My Account button on the Top right location	store_home_Page	btn_MyAccount	moveToElement		FAIL

A	B	C	D
UserName	PassWord	Expected	
testuser_selen_training1		ERROR: The password field is empty.	PASS
	QlIFzliqLIRY	ERROR: The username field is empty.	PASS
testuser_selen_training12	QlIFzliqLIRY	ERROR: Invalid login credentials.	PASS
		Please enter your username and password.	PASS

Figura 16 Resultado de cada iteración.

## Reporte HTML

El reporte HTML que se genera al finalizar la ejecución contiene información detallada de cada caso de prueba y su resultado, así como cada paso de prueba y su hora de ejecución. Se puede ver de forma gráfica el total de casos de prueba que se ejecutaron de forma exitosa y los que no, así como características del equipo en donde se ejecutaron las pruebas, la figura 17 muestra un ejemplo de reporte de ejecución.

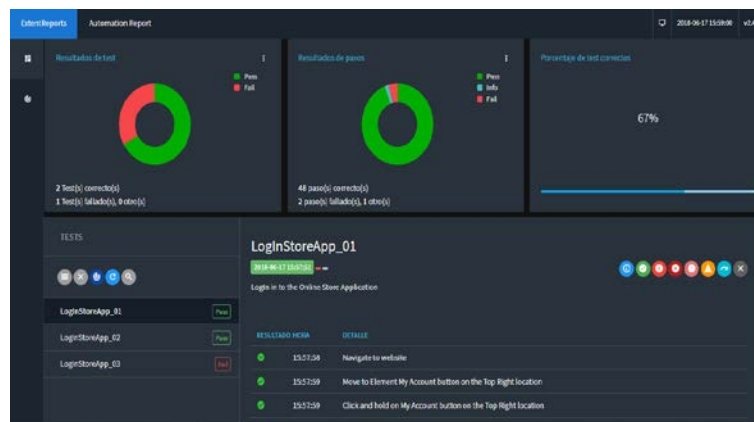


Figura 17 Reporte HTML de ejecución.

## Video y correo

Por último, el framework es capaz de crear un video de la ejecución (figura 18) para tener más evidencia de cada ejecución, y en el caso de que algo falle, un correo informando del error, será enviado.

## 4. Discusión

La elección del framework en la automatización de pruebas será dependiente de la complejidad de cada proyecto y tomando en cuenta las ventajas y desventajas de cada marco. Además de que un factor importante es que la persona o equipos que se encargarán de crear el framework, deberán tener experiencia en desarrollo de software. Pero si hablamos del framework Titanium, nos daremos cuenta de que, desde su estructura, está lo suficientemente modularizado para poder agregar, quitar, o mejorar módulos, ayudando así a ingenieros de pruebas que no tengan experiencia en programación, para poder crear sus propios casos

de prueba automatizados en poco tiempo, ayudando a las empresas a reducir costos de tiempo y dinero en el proceso de calidad de software.

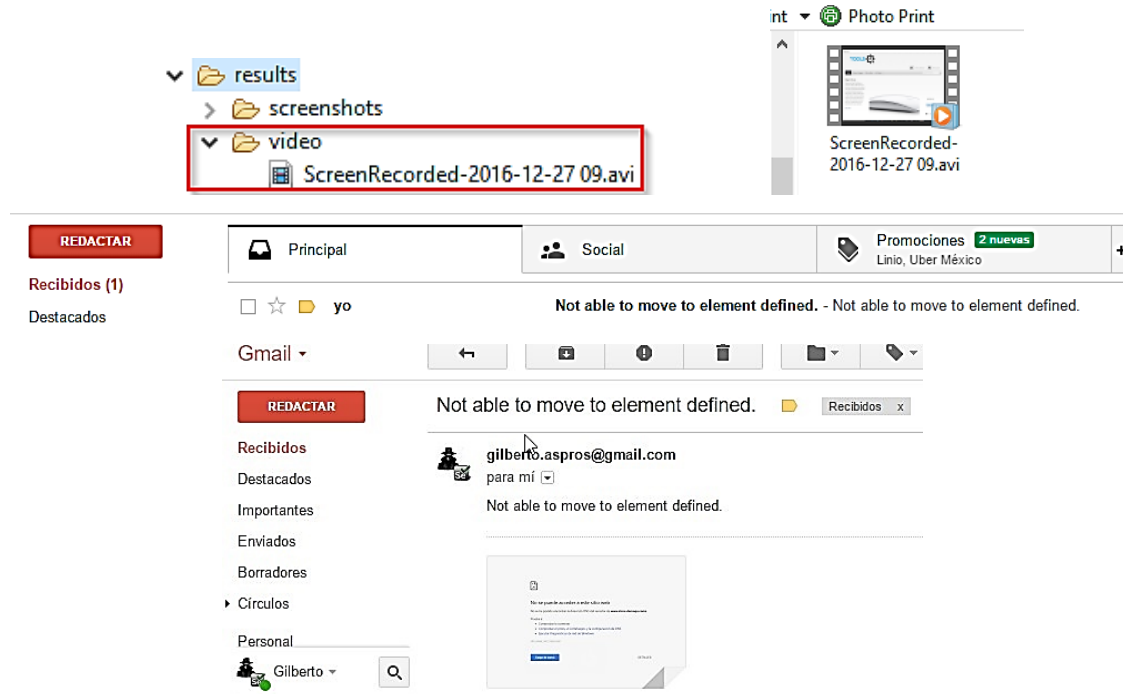


Figura 18 Video de ejecución.

## 5. Conclusiones

La automatización de pruebas, hablando de scripting o desarrollo, es una actividad realizada mediante la programación de software, es decir que un framework de automatización es un desarrollo en sí que se utiliza para realizar pruebas sobre otro desarrollo (aplicación objeto de prueba). El Titanium framework, ha sido implementado en varias empresas de México y el extranjero, las cuales han tenido una reducción en el tiempo de creación de pruebas y de ejecución, aminorando de gran forma el dinero invertido a estas mismas. El proyecto ésta disponible en <https://github.com/gsanchezm/Titanium-Framework-Java> para su descarga y puede ser accedido por cualquier persona.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Bahagga, "Test Automation in Practice", Delft University of Technology, the Netherlands, 2009.



- [2] Fewster, Common Mistakes in Test Automation, Groovy Consultants, 2001.
- [3] Garg, Test Automation Using Selenium WebDriver with Java, AdactIn Group Pty Ltd, 2014.
- [4] Guru99, All About Automated Testing”, <http://www.guru99.com/automation-testing.html>. Mayo 2018.
- [5] Hui, L. Yuqing, L. Pei, G. Jing and G. Shuhan, LKDT: A Keyword-Driven Based Distributed Test Frameworks, International Conference on Computer Science and Software Engineering, 2008, pp. 719-722.
- [6] IBM, Documentación de relational functional tester V9.1.0 [https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSJMXE\\_9.1.0/com.ibm.rational.test.ft.doc/rft\\_welcome.html](https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/es/SSJMXE_9.1.0/com.ibm.rational.test.ft.doc/rft_welcome.html), 2017.
- [7] Kent, Test Automation from record/playback to frameworks, <http://www.simply-testing.com/>, 2007.
- [8] Laukkanen Data-Driven and Keyword-Driven Test Automation Frameworks M.S. thesis, Helsinki University of Technology, Helsinki, Finlandia, 2006.
- [9] Zylberman Shotten, Test Language: Introduction to Keyword Driven Testing, <http://www.softwaretestinghelp.com>, pp. 1-7, 2010.

# **SISTEMA DE MONITORIZACIÓN EN LÍNEA PARA REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS MÓVILES**

## *ONLINE MONITORING SYSTEM FOR MOBILE WIRELESS SENSORS NETWORKS*

**Leonardo Daniel Sánchez Martínez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ldsm@correo.azc.uam.mx*

**Carlos Ernesto Carrillo Arellano**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ceca@xanum.uam.mx*

**Carolina Salinas García**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*alumn\_caro@hotmail.com*

### **Resumen**

Una red de sensores inalámbricos móviles (MWSN) está constituida por nodos capaces de moverse y recolectar información de su entorno mediante sensores. Gracias a la movilidad de estos nodos, la red puede fácilmente incrementar o modificar su área de muestreo. La monitorización de una MWSN es un desafío complejo debido a que la topología de la red cambia constantemente y se puede perder la conectividad entre los nodos. Por lo tanto, para monitorizar una MWSN se necesita de una aplicación que no sólo muestre la posición de los nodos en el área de muestreo y los datos obtenidos por éstos, sino que también muestre en tiempo real los cambios que sufren la topología y la conectividad entre los nodos. En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación Web capaz de mostrar en tiempo real los cambios en la topología de una MWSN, así como los enlaces activos en la red.

**Palabras Claves:** Desarrollo de sistemas, interfaces hombre-máquina, red de sensores móviles.

### **Abstract**

*A mobile wireless sensor network (MWSN) is constituted by nodes capable of move and collect information from their surroundings through sensors.*

*Thanks to the mobility of these nodes, the network can increase or change easily its sampling area. Monitoring an MWSN is a complex challenge because the topology changes constantly and it is common the loss of connectivity between the nodes. Therefore, to monitor an MWSN requires an application that not only shows the position of the nodes in the network and the data obtained by them, but also shows in real time the changes suffered by the topology and the existing connectivity between the nodes This paper presents the development of a web application capable of showing in real time the changes in the topology of a MWSN, as well as the active links in the network.*

**Keywords:** *Human machine interface, systems development, mobile wireless sensor networks.*

## **1. Introducción**

Hoy en día, las redes de dispositivos inalámbricos están presentes en numerosos sectores de nuestra sociedad. Particularmente, la utilización de redes de sensores inalámbricos (*Wireless Sensor Networks* o WSNs) ha incrementado notablemente debido a que estos sistemas permiten capturar información del área geográfica en la que son desplegados. Como consecuencia, las aplicaciones de las WSN van desde el desarrollo de sistemas inteligentes para el transporte público [Katiyar, 2011], hasta la monitorización de variables ambientales para desarrollar sistemas agrícolas inteligentes [Fauzi, 2012].

Una WSN está constituida por pequeños dispositivos autónomos, conocidos comúnmente como nodos. Estos dispositivos están equipados con sensores que permiten monitorizar condiciones físicas o ambientales de un área geográfica. Además, los nodos son capaces de establecer enlaces inalámbricos entre sí para poder encaminar la información recolectada hacia un nodo central denominado como el *sink* de la red [Akyildiz, 2002]. Los nodos encargados de recolectar los datos a lo largo del área de interés se deben distribuir estratégicamente considerando en todo momento que el rango de muestreo de los sensores es reducido. Por lo tanto, es claro que el número de sensores necesarios para monitorizar completamente un área geográfica es proporcional al tamaño del área.

Esto implica que el número de sensores necesarios crezca proporcionalmente al incrementar el área de muestreo. Esto representa un problema cuando el área que se desea monitorizar es de gran tamaño, ya que no solo impone retos para la administración de la red, sino que supone altos costos de infraestructura y, además, se crea una topología de red compleja. La solución más sencilla para resolver este problema de escalabilidad es agregar movilidad a los nodos, ya que de este modo se puede incrementar el área monitorizada por nodo y se reducen los costos de infraestructura. Esto cambia el paradigma de una WSN a una MWSN (*Mobile Wireless Sensor Network*). Sin embargo, agregar movilidad a los nodos trae consigo otros problemas, tales como conectividad intermitente entre los nodos, una topología que cambia dinámicamente, y la dificultad de establecer rutas de comunicación entre los nodos y el *sink* de la red [Ramasamy, 2017]. Aunado a esto, la cantidad de información que puede generar una sola WSN es enorme, por lo que no basta con almacenar los datos capturados por los nodos de la red, sino que además es de suma importancia procesarla en tiempo de ejecución para su presentación a través de interfaces entendibles y amigables que permitan una fácil interpretación de esta. Así, resulta evidente que toda MWSN requiere de un sistema que permita conocer y visualizar el estado de la red en tiempo de real, de manera entendible y amigable, prestando especial atención a la topología dinámica de la red y a los enlaces existentes en ella.

En este trabajo se presenta el diseño, implementación y verificación de un sistema de monitoreo en línea para redes de sensores inalámbricos móviles. Dicho sistema no sólo muestra la información recolectada por los nodos de la red, sino que, además, permite visualizar en tiempo real la topología de la red y sus cambios dinámicos. Además, la aplicación muestra cómo se modifican los enlaces existentes entre los nodos de la red. Con esta información se pueden precisar las dificultades de comunicación entre los nodos de la red.

## **2. Métodos**

Con el surgimiento del llamado Internet de las Cosas o IoT por sus siglas en inglés, el número de dispositivos conectados a Internet se ha incrementado

sustancialmente [Al-Fuqaha, 2015]. Debido a esto, una gran cantidad de datos e información se genera en el mundo, por lo que la visualización de estos se ha vuelto un tema de suma importancia. En particular, en el campo de las redes inalámbricas, diversos esfuerzos se han realizado para el desarrollo de herramientas que permitan visualizar los datos obtenidos por una red de sensores inalámbricos. Por ejemplo, en [Hernández, 2014] se presenta el desarrollo de una aplicación Web para el monitoreo de la temperatura y la humedad a través de una red inalámbrica de sensores estáticos mediante el protocolo ZigBee. Los autores de dicho trabajo se enfocan principalmente en los datos obtenidos de la y dejan de lado el estado de esta. En [Vazquez, 2013] los autores presentan el desarrollo de una aplicación web que permite monitorizar la temperatura de un lugar de manera remota a través de una red de área local o Internet. En ese trabajo los autores se enfocan en el caso de una red con un solo nodo estático. Otros ejemplos de estos esfuerzos son el desarrollo de aplicaciones diseñadas específicamente para el monitoreo del estado de la red, como los trabajos presentados en [Soares, 2013] y [Buschmann, 2005]. En [Soares, 2013] se presenta una propuesta que permite monitorizar de manera remota el estado de una red inalámbrica de sensores, sin embargo, esta sólo funciona para redes estáticas. Por otro lado, en [Buschmann, 2005] se presenta una herramienta para el monitoreo de una red de sensores inalámbricos, sin embargo, esta se ve limitada al tener que ser instalada bajo ciertas condiciones y sólo puede ser utilizada en aquellos equipos en los que se haya instalado. Finalmente, en [Usurelu, 2017] se presenta una herramienta para el monitoreo de datos e información que se puede obtener a partir de diversas redes. La mayoría de estas herramientas de software se basan en el modelo de tres capas de un sistema de información, tal y como se muestra en la figura 1.

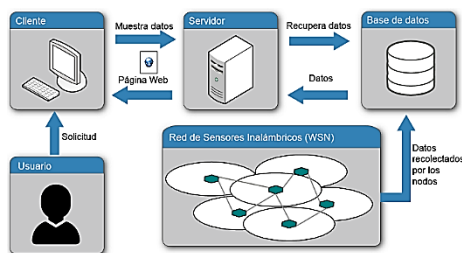


Figura 1 Modelo de tres capas para el diseño de aplicación de visualización de datos.

Como se puede observar, las variables muestreadas por los sensores se almacenan periódicamente en un medio persistente, p. ej. una base de datos, para su posterior consulta y presentación. Normalmente, este tipo de aplicaciones utilizan páginas Web para presentar los datos adquiridos por la WSN, de modo que las páginas Web se generan al momento de la consulta con los datos disponibles en el medio de almacenamiento persistente. Para ello, el servidor utiliza un lenguaje programación que recupera los datos del medio persistente, y posteriormente, se construye una página Web con los datos obtenidos. Es claro que este tipo de aplicaciones sólo permiten conocer el estado actual de la red cuando se realiza una petición explícita, es decir, cuando se realiza una consulta de manera directa por parte del usuario. Lo anterior limita ampliamente el potencial de este tipo de aplicaciones, ya que cada vez que se quiere conocer el estado de la red se tiene que repetir todo el ciclo de descrito en la figura 1. Bajo este enfoque, se tiene que solicitar constantemente el estado de la red para verificar la existencia de algún cambio, aumentado así la carga del sistema y la latencia de la respuesta para la aplicación. Se puede notar que el enfoque de la consulta de datos descrito anteriormente no es adecuado para aplicarlo a las MWSN, ya que no atienden los requerimientos de visualización de datos y ubicación espacial de los nodos en tiempo real. En este trabajo se propone diseñar una aplicación que permita monitorizar el estado de una MSWN en todo momento y en todo lugar. Para ello, se propone utilizar el protocolo HTTP como protocolo de la capa de aplicación para realizar la consulta y presentación de datos. El esquema propuesto contempla el uso de tecnologías Web 2.0, tal y como se muestra en la figura 2.

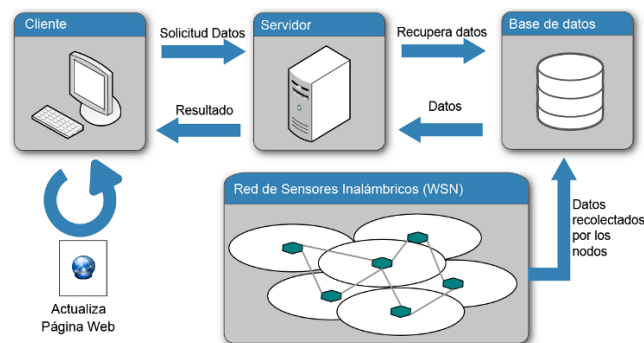


Figura 2 Modelo de comunicación propuesto entre los módulos de la aplicación.

La propuesta consiste en combinar el modelo de 3 capas con tecnologías asíncronas para crear una aplicación interactiva que permita conocer el estado de una WMSN en todo momento, en todo lugar, reduciendo la carga en el servidor, requiriendo una baja latencia de respuesta y sin necesidad de que el usuario solicite la información de manera explícita. Es decir, la aplicación monitoriza en tiempo real la ubicación de los nodos, las lecturas realizadas por los ellos, así como los cambios en la topología de la red y las modificaciones sufridas en los enlaces de comunicación.

La aplicación propuesta consiste en tres niveles: modelo, vista y controlador. Para el modelo se propone el uso de una Base de Datos (BD) relacional considerando que un espacio solo puede existir una y solo una red de sensores. Además, se considera que cada nodo monitorea su entorno cada cierto tiempo, lo que deriva en las entidades, atributos y relaciones descritos en la figura 3.

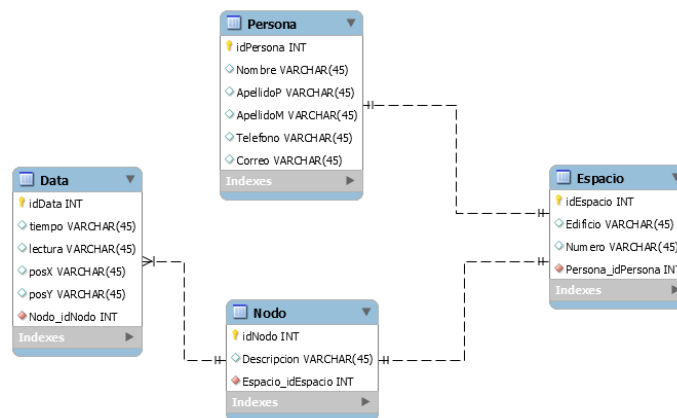


Figura 3 Diagrama Entidad-Relación para el sistema de monitorización.

Es importante señalar que, por el momento, la aplicación propuesta en este trabajo es independiente del protocolo de intercambio de mensajes empleado por la red de sensores. Es sabido que existen diversos protocolos de capa de aplicación para la transmisión de datos en una red de sensores, tales como los protocolos Message Queue Telemetry Transport (MQTT) y Constrained Application Protocol (CoAP) [Karagiannis, 2015]. Sin embargo, la aplicación propuesta parte de una premisa importante, cada que los sensores inalámbricos generan datos, estos son

recibidos por un nodo central, el cual podría ser un cliente MQTT, y almacenados en una base de datos. En consecuencia, la manera en la que los procesos de comunicación en la red y de almacenamiento en la base de datos son, momentáneamente, transparentes para la aplicación propuesta, pues la aplicación detecta únicamente las inserciones de información en la base de datos y reacciona a dichos eventos.

Para el desarrollo del controlador se emplea el lenguaje PHP 7 del lado del servidor y Java Script 5 del lado del cliente. En este caso, el servidor utiliza PHP para recuperar los datos de la BD y procesarlos, posteriormente los datos se entregan al cliente en forma de resultado. En este punto, es muy importante señalar que cuando el usuario hace por primera vez una solicitud explícita de información, el servidor construye una página Web como respuesta. Dicha página incluye código JavaScript para que ésta se actualice automáticamente de manera periódica.

Posterior a esto, no es necesario que el usuario vuelva a solicitar la información de manera explícita, es la misma página quien manda la solicitud de información. En este caso, el servidor no construye ninguna página Web, solo utiliza PHP para recuperar los datos de la BD y los entrega en un formato específico al cliente. De esta manera el cliente no recarga toda la página Web, sino una parte de esta. Para ello, es necesario emplear tecnología AJAX con el objeto *XMLHttpRequest* para hacer envíos de solicitud de información asíncronos. Finalmente, para la presentación de información se propone utilizar en el lado del cliente HTML 5 con CSS 3 y Java Script para la solicitud y actualización de la página Web. La figura 4 muestra los componentes del sistema y su interacción.

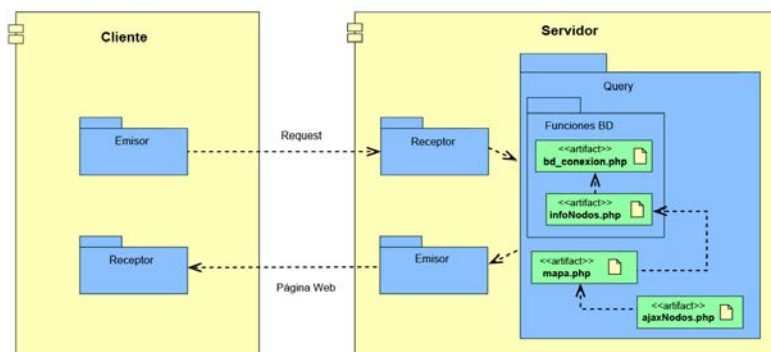


Figura 4 Diagrama de componentes del sistema.



### 3. Resultados

Para realizar pruebas operativas a la herramienta de monitorización se utilizó el programa BonnMotion [Aschenbruck, 2010]. Esta herramienta de software permite crear trazas de movilidad, las cuales se emplearon para simular el comportamiento de una red inalámbrica de sensores móviles. El movimiento de cada nodo es controlado empleando una traza de movilidad generada por BonnMotion. Para las pruebas realizadas se tomó en consideración una red de sensores constituida por 10 nodos móviles. La movilidad de dichos nodos se define mediante el modelo *Random Way Point*. Los datos generados por la traza de movimiento son: identificador de nodo, posición en el eje x, posición en el eje y, y tiempo en el que se detecta un movimiento. Posteriormente, a estos datos se les agregaron las lecturas de datos simulados con números aleatorios. Por el momento, sólo se generaron los datos relacionados a la temperatura, sin embargo, se pueden generar cualquier cantidad de datos deseados. A continuación, la traza de movilidad se inserta, registro por registro, en la BD con un retardo de 2 segundos entre cada registro de la traza para simular de esta manera la generación de datos periódicos de la red. Este proceso de inserción de información en la base de datos puede simular la comunicación entre un cliente MQTT y la base de datos. Por el momento, se asume que este proceso es transparente para la aplicación y, para los objetivos de este proyecto, se puede omitir. El resultado obtenido se muestra en la figura 5.

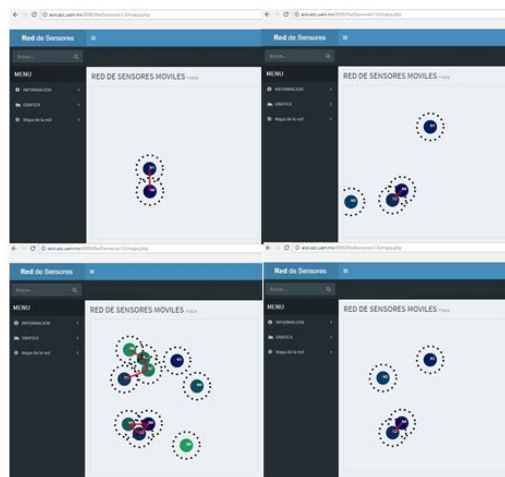


Figura 5 Funcionamiento del sistema.

Como se puede apreciar, la herramienta permite visualizar en todo momento la posición de todos los nodos, la topología de la red, así como la conectividad, si es que existe entre los nodos de la red. La herramienta de monitorización está disponible en la dirección Web <http://aisii.azc.uam.mx:8888/RedSensores1.0/>, en donde se puede verificar su funcionamiento. Adicionalmente, la aplicación cuenta con una sección para cargar cualquier traza obtenida mediante el software BonnMotion. Esta traza se cargará en el sistema y se visualizará a través de la herramienta de monitorización. En enlace para que el usuario pueda subir una traza creada con el software BonnMotion encuentra disponible en el siguiente enlace web <http://aisii.azc.uam.mx:8888/RedSensores1.0/formularioTraza.html>. El código fuente de la aplicación también está disponible en el siguiente enlace <http://aisii.azc.uam.mx:8888/RedSensores1.0/codigo.zip>.

#### **4. Discusión**

Hoy en día existen diversas herramientas que permiten monitorizar y visualizar el estado de una red de sensores, pero muy pocas permiten conocer los cambios dinámicos que tiene de una red de sensores móviles. La aplicación desarrollada en este trabajo permite monitorizar en tiempo real un espacio geográfico mediante una red de sensores móviles. Esta aplicación no solo visualiza la topología de la red, sino que también permite verificar el estado de los enlaces de la red. Si bien, la herramienta funciona empleando los datos generados en nuestras pruebas, también funciona para cualquier otra traza generada con la herramienta BonnMotion y para cualquier conjunto de datos generados por una red de sensores móviles, siempre y cuando cumplan con el formato establecido por la aplicación. Por otro lado, la aplicación permite visualizar la traza generada por la herramienta BonnMotion, lo que la convierte en un complemento de esta última. De esta manera, la herramienta presentada en este trabajo, en conjunto con el simulador BonnMotion, generan una herramienta para el complemento en el aprendizaje de redes de comunicación.

Es importante enfatizar que la aplicación web se ha evaluado simulando el comportamiento una red de sensores. Es decir, los protocolos de comunicación

entre los nodos de la red y el procesamiento de los datos en el *sink* han sido omitidos. La traza de datos generados por la aplicación BonnMotion ha sido considerada como una simulación del comportamiento de la red de sensores móviles.

Es importante recordar que el objetivo de esta propuesta se centra en el desarrollo de la aplicación web y no en la implementación de la red. Una vez que se ha verificado que la aplicación web refleja fielmente el comportamiento de la red de sensores simulada, se puede implementar como trabajo futuro una red de sensores e integrarla con la aplicación web para validar conjuntamente todo el sistema.

## **5. Conclusiones**

En este trabajo se presenta el desarrollo de una aplicación Web que permite monitorizar una red de sensores inalámbricos móviles. Las características más significativas de esta aplicación son las siguientes:

- La aplicación permite visualizar en tiempo real los cambios que sufre la topología de la red y, además, permite visualizar claramente el estado de los enlaces entre los nodos. De esta manera es posible atender los problemas de conectividad dentro de la red.
- La aplicación visualiza la información capturada por los nodos de la red, así como su evolución temporal.
- Esta aplicación puede funcionar como un buen complemento para visualizar trazas generadas con el software BonnMotion, lo cual le brinda versatilidad a la aplicación.

Finalmente, el código de la aplicación, así como la versión de prueba, han sido puestos a disposición de la comunidad para que se realicen pruebas y/o mejoras. Como trabajo futuro los autores pretenden agregar a la aplicación funciones que les permitan desplegar servicios o funciones especiales a los sensores remotos de manera sencilla e intuitiva. Además, los autores integrarán la aplicación web con una red de sensores implementada en hardware. Se espera que los nodos de la

red empleen un protocolo de comunicación de la capa de aplicación, tal como CoAP ó MQTT, así como desarrollar funciones que permitan introducir los datos capturados por la red de sensores en la base de datos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Akyildiz, I.F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E, Wireless sensor Networks: A survey, Computer Networks, Vol. 38, 393-422, 2002.
- [2] Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M., Internet of Things: A survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications, IEEE Communications Surveys and tutorials, Vol. 17, No. 4, 2347-2376, 2015.
- [3] Aschenbruck, N., Ernst, R., Gerhards-Padilla, E. & Schwamborn, M., BonnMotion: a mobility scenario generation and analysis tool, Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, 2010.
- [4] Buschmann, D. Pfisterer, S. Fischer, S. Fekete, A.Kröller, SpyGlass: a wireless sensor network visualizer, ACM SIGBED Review, vol. 2, pp. 1-6, 2005.
- [5] Fauzi, M. Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System, International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors, No. 41, 1204-1210, 2012.
- [6] Hernández Hernández, Red de monitoreo remoto inalámbrico de sensores con dispositivos ZIGBEE, proyecto terminal, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, 2014.
- [7] Karagiannis, V. Chatzimisios, P., Vazquez-Gallego, F., & Alonso-Zarate, J. A Survey on Application Layer Protocols for the Internet of Things, Transactions on IoT and Cloud Computing, 2015.
- [8] Katiyar, V., Kumar, P. & Chand N. An Intelligent Transportation Systems Architecture using Wireless Sensor Networks, International Journal of Computer Applications, Vol. 14, No. 2, 22-26, 2011.

- [9] Ramasamy, V., Mobile Wireless Sensor Networks, Wireless Sensor Networks Philip John Sallis, IntechOpen, 2017.
- [10] Soares, Wireless Sensor Networks Monitoring Tool, reporte final, FCTUC, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2013.
- [11] Usurelu, C.C. & Pop, F., My City Dashboard: Real-time Data Processing Platform for Smart Cities, Journal of Telecommunications and Information Technology, 89-100, 2017.
- [12] Vázquez Sánchez, Monitoreo de Temperatura a través de una aplicación web, Universidad Autónoma del Estado de México, 2013.

# **ESQUEMA PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS, EN UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN INTERNA**

## *SCHEME FOR DETECTION AND LOCALIZATION OF FAILURES, IN AN INTERNAL COMBUSTION SYSTEM*

### **Airam Monserrat Sánchez Villalobos**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*airamm.savii@gmail.com*

### **Elvia Ruiz Beltrán**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*elvia71@hotmail.com*

### **Jorge Octavio Valdés Valadez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*octavio.valdes.ita@gmail.com*

### **Jorge Luis Orozco Mora**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*drorozco@mail.ita.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se propone un método para detectar y localizar las fallas en un sistema de combustión interna, sistema analizado y modelado bajo el enfoque de redes complejas, revisando sus propiedades estructurales que indican el grado de robustez ante la presencia de fallas (ataques o fallas aleatorias). Se propone una simulación para comprobar que los elementos que son poco robustos provocan fallas en el sistema, lo anterior se logra gracias a la implementación de una interfaz gráfica en LabVIEW que permite monitorear fallas en presión, vibraciones, y temperatura, que se presentan en el sistema.

**Palabras clave:** fallas, redes complejas, propiedades estructurales, motor de combustión interna.

## **Abstract**

In this work, we propose a method to detect and locate faults in an internal combustion system under the complex networks approach, reviewing its structural

properties that indicate the degree of robustness in the presence of faults (random attacks or failures). A simulation is proposed to verify that elements that are not very robust cause failures in the system; this is achieved thanks to the implementation of a graphical interface in LabVIEW that allows monitoring failures in; pressure, vibrations, and temperature, which occur in the system.

**Keywords:** faults, complex networks, structural properties, internal combustion engine.

## 1. Introducción

A lo largo de los años, nos hemos rodeado de sistemas que tienden a tener más componentes que interactúan entre sí complicando la predicción en su funcionamiento y por ende tiene una alta posibilidad de fallar, estos sistemas se conocen como sistemas complejos. Un sistema complejo, se define como aquel que está compuesto por una cantidad enorme de partes que interactúan entre sí, cada parte tiene su propia estructura y cumple una función específica, esto quiere decir que lo que ocurra con cierta parte del sistema, influirá a todo éste. Como ejemplos de este tipo de sistemas encontramos sistemas biológicos (el cerebro humano, la naturaleza), de información (redes físicas, redes sociales, etc.) y de tecnología (infraestructuras como suministro de agua, transporte, las estaciones de combustible, energía, entre otras) [Albert-Laszló Barabási, 2016]. El análisis de fallas en sistemas complejos, ha sido recientemente abordado para analizar sistemas de manufactura flexible [Reyes Luevano, 2017] y [Reyes Lúevano, 2018], fallas en cascada en redes de distribución eléctrica [V. Buldyrev, 2010], redes de comunicación que controlan redes eléctricas [Shao, v, 2011]; dichas metodologías aplicadas resultan ser exitosas ya que permiten detectar y localizar fallas en los sistemas de manera precisa.

Actualmente, la industria en general implementa Sistemas de Manufactura Flexible (SMF) en sus procesos de producción, con el propósito de aumentar la productividad, disminuir los costos de producción y mejorar la calidad de sus productos [Reyes Lúevano, 2018]. En el caso de redes de distribución eléctrica, experimentan apagones con frecuencia, que en gran medida son resultado de una

falla en cascada entre redes interdependientes, el problema ha sido dramáticamente ejemplificado por varios apagones a gran escala que han ocurrido en los últimos años, tal es el caso de la red eléctrica y de internet de Italia implicadas en el apagón en septiembre de 2003; donde al tener identificadas las subestaciones de la red eléctrica y los servidores de internet, donde el tamaño de una red también llamada distribución de grados más amplia aumenta la vulnerabilidad de las redes de interdependientes a la falla aleatoria, que es opuesta a cómo se comporta una red única [V. Buldyrev, 2010].

En el caso de la industria automotriz, se ha convertido en un apoyo económico importante para los países más desarrollados durante los últimos años en el sector industrial [Z., H., 2008]. Con el paso de los años, los automóviles han cambiado su funcionamiento tradicional; de una máquina estructurada a una máquina electrónica compleja. Si estudiamos un automóvil como un sistema complejo, podemos dividirlo en los sub sistemas que lo integran; motor, suspensión, dirección, frenos y transmisión. El motor es la parte principal del automóvil ya que él es quien proporciona la fuente de energía al resto de los subsistemas. Es un sistema de máquina compleja, incluida su estructura. El parámetro de estado técnico del motor cambiará en diferentes formas e intensidad, que empeoran los parámetros de rendimiento. El estado del motor influye en la seguridad y fiabilidad del automóvil directamente y es una de las partes más fallidas, por lo cual es el principal objeto de detección y localización de fallas para nuestra investigación.

En [Z., H., 2008] desarrollaron un sensor avanzado que captura las características y dinámica de un motor, donde se analiza, distingue, reconoce y determina el error. Además, pronostica sus tendencias de procesamiento, descubre su razón, ubicación y severidad, permitiendo que se realice el mantenimiento correspondiente o apliquen los métodos de procesamiento para localizar en donde está situada la falla dentro del sistema que analizan. Aplican una técnica de redes neuronales; donde se detecta la falla del motor de un automóvil, adoptan una red neuronal *Back Propagation* (BP) mejorada. Otra de las investigaciones realizadas en los últimos años sobre fallas en motores de combustión es la realizada en el año 2014 por el investigador Aleksandar Vencel [Aleksandar Vencel, 2014], donde se



examinan 616 cojinetes del cigüeñal, dañados por diferentes mecanismos. Los rodamientos se instalaron en Motores diésel de alta velocidad, y se reunieron durante dos años, en las reparaciones (Revisión), es decir después de 3000-5000 horas de trabajo. Después del examen de los cojinetes, se realizó el análisis del árbol de fallas FTA (failure tree analysis, por sus siglas en inglés) para determinar las causas de raíz del motor por fallas en los cojinetes. En el trabajo se concluyó que las causas principales que conducen a daños y fallas de los cojinetes lisos son numerosas, y muy a menudo son varias causas que contribuyen simultáneamente. Además, la carcasa de cojinete y la contra-cara contra la que funciona el cojinete también contribuyen. Todas estas causas se pueden dividir en varios grupos que incluyen aspectos de diseño, selección de material, imperfecciones de material, fabricación y post-tratamiento, almacenamiento, transporte, montaje, inspección, mantenimiento, funcionamiento imprevisto (como sobrecarga) y daños mecánicos y / o químicos directos durante el funcionamiento. Los resultados que se proponen en este artículo, consideran un motor de combustión interna como un sistema complejo, identificando en principio cada uno de sus componentes y la interacción entre ellos, así como el nivel de importancia dentro del mismo. El análisis obtenido representa una serie de escenarios en los cuales podemos identificar y localizar fallas a través de la comunicación del modelo matemático con el controlador; que reciba y envíe información de nuestro sistema de combustión

## **2. Métodos**

En esta sección se profundiza en algunos conceptos básicos sobre grafos y teoría de redes complejas, basada en propuesta de Lazsló Barabási [Albert-Laszló Barabási, 2016] para modelar y analizar propiedades en sistemas complejos.

### **Redes complejas**

En este trabajo se propone el modelado de un sistema de combustión interna mediante el enfoque de redes complejas, ya que, si consideramos modelar todo el motor, éste podría tener cientos de elementos que interactúan de forma intrincada

y por ello resulta eficaz modelarlos con sistemas complejos. Los sistemas complejos se modelan mediante un grafo [Albert-Laszló Barabási, 2016] como el que se muestra en figura 1. A esta representación se le denomina Red Compleja.

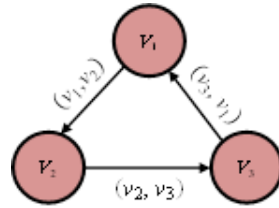


Figura 1 red compleja.

Una red compleja se define en términos de la teoría de grafos como un par ordenado de conjuntos  $\square := (V, \varepsilon)$ , donde  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  es el conjunto de  $N = |V|$  elementos vértices (nodos) de la red. Así mismo,  $\varepsilon$  denota al subconjunto de aristas de  $[V]^2$ ; en otras palabras  $\varepsilon \subseteq (V \times V)$ . En este sentido, para una red (dirigida y no dirigida) una arista  $\varepsilon := (v_i, v_j) \in \varepsilon$  es gráficamente un arco dirigido del nodo  $v_i \in V$  al nodo  $v_j \in V$ ; donde  $i$  denota al tallo,  $j$  denota la cabeza y  $w_{\varepsilon_j}$  peso de arista.

La estructura de la red puede ser descrita a través de una representación matricial. La matriz  $A_{N \times N}$  captura la relación de adyacencia entre pares de nodos de la red, de la siguiente forma:  $A_{ij} = 1$  si existe una arista que se dirija del nodo  $j$  al nodo  $i$ , o en su caso  $A_{ij} = 0$  si no existe conexión entre los nodos  $i$  y  $j$ .

### Propiedades estructurales de las redes complejas

Existen ciertas propiedades que presentan los Nodos (N) y Links (L) dentro de un sistema complejo:

- **Grado (Degree):**  $k_i$  (llamado grado) es número de links que tiene el nodo  $i$ .

En una red no dirigida, el número total de enlaces  $L$ , se puede expresar como la suma de los grados de los nodos, la ecuación 1 representa el número de links que tiene una red con  $N$  nodos.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i \quad (1)$$

- **Grado promedio:** para una red no dirigida el número de links en promedio que tiene cada nodo  $i$  se representa según la ecuación 2.

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i = \frac{2N}{L} \quad (2)$$

En la ecuación 3 se muestra como en el caso de redes dirigidas distinguimos entre grado entrante,  $k_i^{in}$ , que representa el número de links que apuntan al nodo  $i$ , y grado saliente,  $k_i^{out}$ , que representa el número de links que apuntan desde el nodo  $i$  a otros nodos.

$$k_i = k_i^{in} + k_i^{out} \quad (3)$$

La cantidad total de enlaces en una red dirigida se obtiene con ecuación 4.

$$L = \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \sum_{i=1}^N k_i^{out} \quad (4)$$

En la ecuación 5 se calcula el grado promedio de una red dirigida como:

$$\langle k^{in} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \langle k^{out} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{out} = \frac{L}{N} \quad (5)$$

- El **grado de distribución**, representado como  $P_k$ , proporciona la probabilidad de que un nodo seleccionado al azar en la red tenga el grado  $k$ . Como  $P_k$  es una probabilidad, debe normalizarse, como se muestra en la ecuación 6.

$$\sum_{k=1}^{\infty} P_k = 1 \quad (6)$$

Para una red con  $N$  nodos, la distribución de grados es un histograma normalizado que viene dado por la ecuación 7, representada de la siguiente manera.

$$P_k = \frac{N_k}{N} \quad (7)$$

Donde  $N_k$  es la cantidad de nodos de grados  $k$ . Por tanto, se puede obtener el número de nodos de grado  $k$  a partir de la distribución de grados como  $N_k = N P_k$ .

En la expresión 8 se observa como el grado promedio de la red compleja está en función de  $P_k$ , lo cual es particularmente importante en redes con miles o millones de nodos en los cuales no se conoce de manera precisa su estructura, como en caso de un cerebro humano.

$$\langle k \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k \quad (8)$$

- **Matriz de adyacencia:** Una descripción completa de una red requiere que hagamos un seguimiento de sus enlaces. Para propósitos matemáticos, a menudo representamos una red a través de su matriz de adyacencia  $A_{N \times N}$ . La matriz de adyacencia de una red dirigida de  $N$  nodos tiene  $N$  filas y  $N$  columnas, siendo sus elementos:

- ✓  $A_{ij}=1$  Si hay un link que apunta desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ .
- ✓  $A_{ij} = 0$  Si los nodos  $i$  y  $j$  no están conectados entre sí.

La matriz de adyacencia de una red no dirigida tiene dos entradas para cada link. El link (1, 2) se representa como  $A_{12} = 1$  y el link (2,1) es  $A_{21} = 1$ . Por lo tanto, la matriz de adyacencia de una red no dirigida es simétrica, es decir  $A_{ij} = A_{ji}$ .

El grado  $k_i$  del nodo  $i$  mostrado en la ecuación 9, se puede obtener directamente de los elementos de la matriz de adyacencia. Para redes no dirigidas, el grado de un nodo es una suma de las filas o las columnas de la matriz, es decir:

$$k_i = \sum_{j=1}^N A_{ji} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (9)$$

Para redes dirigidas, las sumas sobre las filas y columnas de la matriz de adyacencia proporcionan los grados de entrada y salida del nodo  $i$ , los cuales se calculan como en la ecuación 10.

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^N A_{ij}, \quad k_i^{out} = \sum_{j=1}^N A_{ji} \quad (10)$$

Dado que en una red no dirigida el número de enlaces salientes es igual al número de enlaces entrantes, tenemos que los grados de entrada y salida se obtienen como se indica en la ecuación 11.

$$2L = \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \sum_{i=1}^N k_i^{out} = \sum_{ij} A_{ij} \quad (11)$$

El número de elementos distintos de cero de la matriz de adyacencia es  $2L$ , o el doble de la cantidad de links. De hecho, un link no dirigido que conecta los nodos  $i$  y  $j$  aparece en dos entradas:  $A_{ij} = 1$ , un link que apunta desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ , y  $A_{ji} = 1$ , un enlace que apunta de  $j$  a  $i$ .

En la figura 2 se muestra la matriz de adyacencia de una red no dirigida. El grado de un nodo (en este caso el nodo 2) se puede expresar como la suma sobre la columna apropiada o la fila de la matriz de adyacencia.

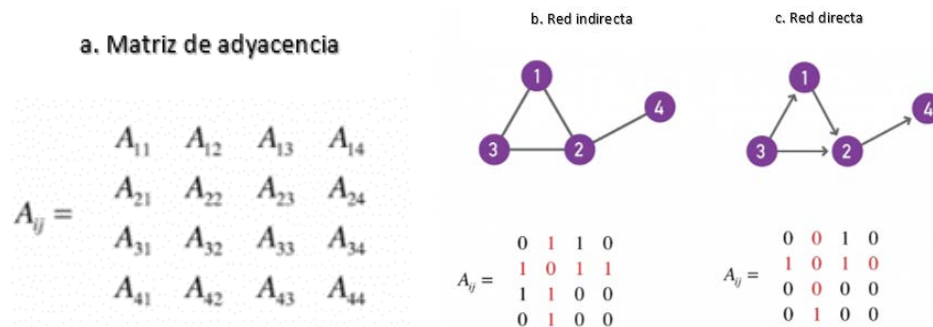


Figura 2 Ejemplo de una matriz de adyacencia [Albert-Laszló Barabási, 2016].

También muestra algunas características básicas de la red, como el número total de enlaces,  $L$  y el grado promedio  $\langle k \rangle$ , expresado en términos de los elementos de la matriz de adyacencia. Lo mismo que en (b) pero para una red dirigida.

- **Redes bipartitas:** Un gráfico bipartito es una red cuyos nodos se pueden dividir en dos conjuntos disjuntos  $U$  y  $V$  de manera que cada enlace conecta un nodo  $U$  a un nodo  $V$ . En otras palabras, si coloreamos los nodos en  $U$  en verde y los nodos en  $V$  en púrpura, entonces cada enlace debe

conectar nodos de diferentes colores; lo cual es una proyección de un conjunto a otro. En la figura 3 se muestra como es la relación entre una red bipartita, la cual tiene 2 conjuntos de nodos uno  $U$  y otro  $V$ . Los nodos en el conjunto  $U$  se conectan directamente sólo a los nodos en el conjunto  $V$ . Por lo tanto, las proyecciones generan otro grafo en base a las conexiones de la red. La proyección  $U$  se obtiene conectando dos nodos  $U$  entre sí; si se unen al mismo nodo  $V$  en la representación bipartita. La proyección  $V$  se obtiene conectando dos nodos  $V$  entre sí si se conectan al mismo nodo  $U$  en la red.

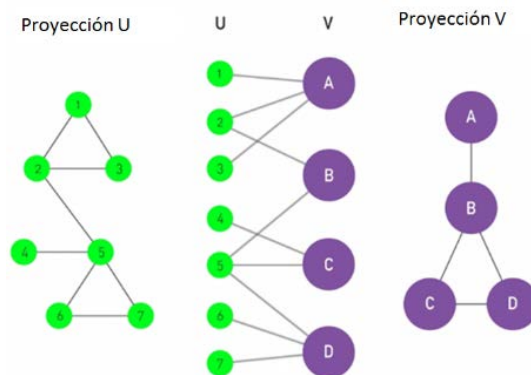


Figura 3 Ejemplo de una red bipartita [Albert-Laszló Barabási, 2016].

### Metodología de modelado

Para obtener el modelo de una red compleja (RC) de un sistema se aplica la metodología propuesta en [Reyes Lúevano, 2018]:

- Se parte del hecho de que el modelo de red compleja está dirigido a describir la estructura y la dinámica de los elementos (nodos) del sistema bajo estudio.
- Cada nodo es un elemento sensor, actuador o dispositivo de control. La interrelación entre dichos elementos se estructura a partir de aristas que permiten establecer una influencia, transporte de energía o flujo de información entre los nodos del sistema.
- Desde la perspectiva más general, la respuesta (comportamiento) de un nodo está constituida por una componente en aislamiento más una componente de interrelación.

- La componente en aislamiento en la RC se modela a través de un nodo activo. Por su parte, la componente de interrelación y total dependencia entre los elementos de una RC, se modela a través de nodos pasivos.
- Tanto la componente en aislamiento y la de interrelación poseen una estructura de RC. Entonces, el modelo de RC del sistema es el resultado de la unión lógica ( $\cup$ ) de la estructura de RC de la componente en aislamiento y bajo condición de interrelación de los nodos.

### **Modelo y análisis de un motor de combustión interna**

En este trabajo se propone el modelo en red compleja de un motor de combustión interna (véase la figura 4 para identificar sus partes), en el cual se involucra el sistema mecánico y el sistema de lubricación, los cuales tienen cierta sincronización entre sí.

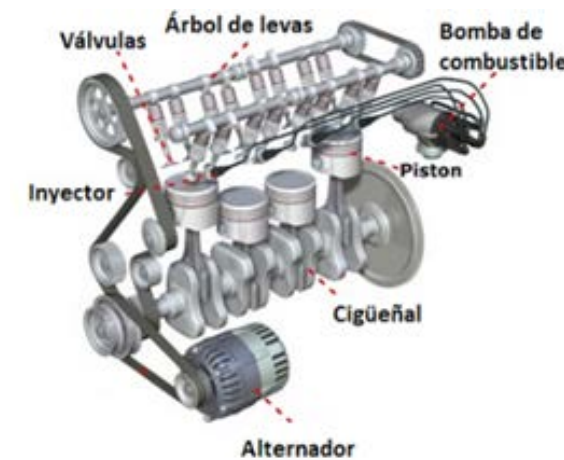


Figura 4 Sistema de combustión interna.

El funcionamiento de un motor de combustión interna consta de una serie de entradas con el fin de conseguir una salida en forma de energía mecánica. En los motores de combustión interna, el ciclo de trabajo del motor presenta varias fases, en principio se introduce en el cilindro una carga de aire y combustible que posteriormente se inflama y elevada la presión y produce la fuerza necesaria que impulsa a los pistones y hace girar al cigüeñal, transformando la energía química contenida en el combustible en energía mecánica de rotación. Posteriormente, el

gas quemado es vertido al exterior y se sucede un nuevo ciclo. Cabe resaltar que la inflamación del combustible se realiza siguiendo un ciclo de funcionamiento de dos o cuatro tiempos, logrando el encendido del combustible mediante el salto a una chispa eléctrica (esto en motores a gasolina).

El modelo en red compleja del sistema de combustión interna se muestra en la figura 5. Se usó el software Gephi [M., 2009] para su representación gráfica y obtener la matriz de adyacencia (que posteriormente se importó a Matlab para realizar el análisis de las propiedades). El modelo de RC propuesto está compuesto por 74 nodos ( $N=74$ ), 143 links ( $L=143$ ) y es una red no dirigida.

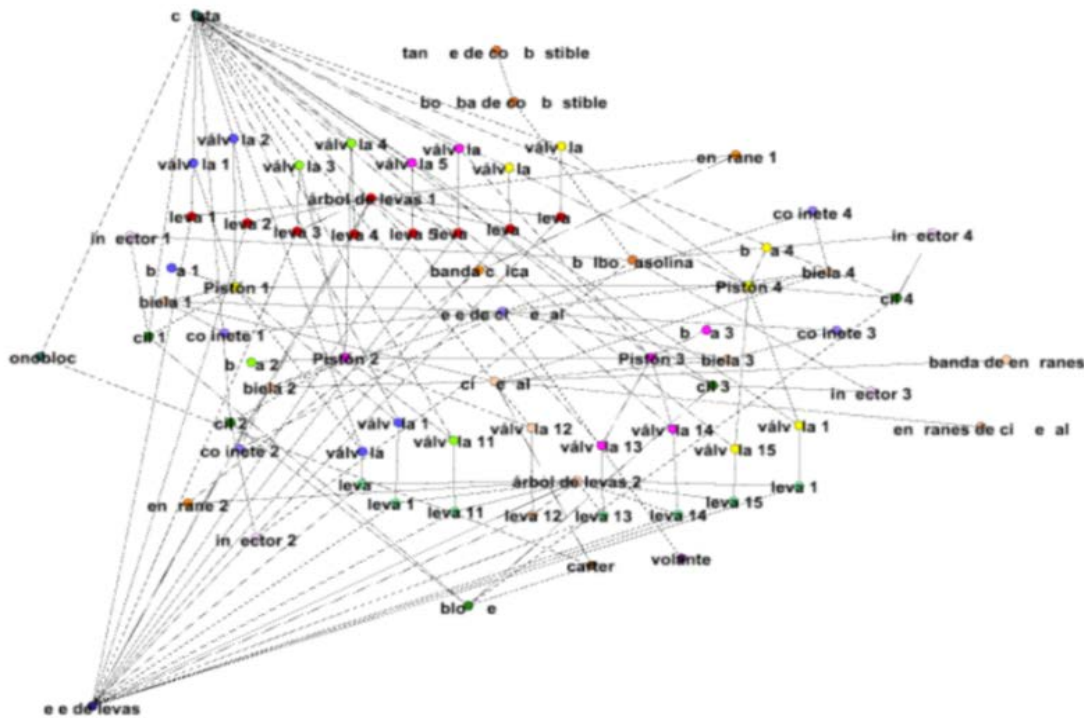


Figura 5 Modelo de red compleja del sistema de combustión interna.

La red propuesta en la figura 5, corresponde a una red no dirigida que pertenece al motor de combustión interna, descrito previamente. A continuación, se analizan algunas propiedades de la red del sistema de combustión interna (se tomó la matriz de adyacencia generada por Gephi y se importó en MatLab, donde se desarrollaron los algoritmos para llevar a cabo el análisis de las propiedades estructurales del sistema).



En la ecuación 12 se muestran los links que contiene la red.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{63 + 11 + 16 + 53}{2} = \frac{143}{2} = 71.5 \quad (12)$$

Donde la máxima cantidad de links se presenta en la ecuación 13.

$$L_{max} = \frac{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}; \quad = \frac{74(74-1)}{2} = 2701 \quad (13)$$

Esto significa que el sistema de combustión interna tendrá como máximo una conexión de 2701 de nodo a nodo entre todos ellos, ya que no todos los elementos del motor se pueden relacionar con el resto de nodos de la red.

El grado promedio de la red, se muestra en la ecuación 14.

$$\langle K \rangle = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N K_i = \frac{2L}{N} = \frac{2(123)}{74}; \quad \langle K \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i = \frac{143}{37} = 3.8648 \quad (14)$$

El grado promedio de links que tiene cada nodo en el sistema de combustión interna será  $\langle K \rangle = 3.8648$ .

### Degree Distribution

En la figura 6 se muestra el comportamiento del sistema por medio de su grado de distribución, utilizando las funciones `plot`.m y `fit`.m de Matlab, se obtiene el exponente  $\gamma$  (gamma) de la ley de potencia mostrada en la ecuación 15. Donde  $P_k$  es la probabilidad de encontrar un nodo de grado  $K$ .

$$P_k \sim K^{-\gamma} \quad (15)$$

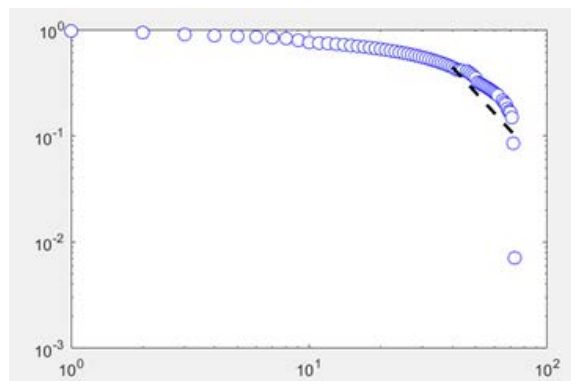


Figura 6 Grado de distribución de la RC.

Para la red compleja del sistema de combustión interna  $\gamma = 3.43$ , por lo que se concluye que el sistema complejo del motor de combustión interna se comporta como un red de mundo pequeño “Small World”. Es decir, que en esta red si existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala “Scale Free” pero estos nodos concentradores no son suficientemente grandes en número para tener un impacto en la distancia entre los nodos. Para este tipo de redes con  $\gamma > 3$  la distancia promedio se calcula con ecuacion 16.

$$\langle d \rangle \sim \ln N \quad \ln(74) \sim 4.3 \quad (16)$$

Por lo que, la distancia promedio entre los nodos del sistema de combustión es  $\langle d \rangle \sim 4$ , siendo esta la dependencia que hay entre los nodos del sistema. Esta dependencia significa que, por cada nodo, aproximadamente 4 dependen de él, es decir, la red no va a colapsar por completo, únicamente bajará su rendimiento.

### Esquema propuesto

El esquema que se propone en este trabajo para detectar y localizar las fallas del sistema de combustión interna se presenta en la figura 7.

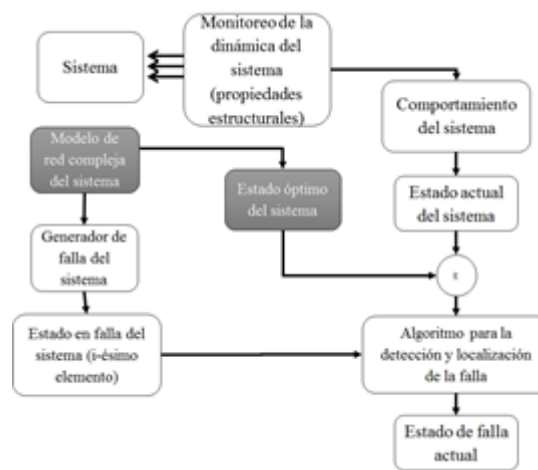


Figura 7 Esquema propuesto de detección y localización de fallas para el sistema.

El factor más importante para estimar la magnitud de una falla en la red es conocer el comportamiento del sistema. El esquema consta de los siguientes elementos:

- El módulo de monitoreo de la dinámica del sistema, integrado por los sensores que estarán evaluando las variables a estudiar.
- Una vez que obtenemos una serie de datos experimentales, es decir, evaluar el comportamiento del motor por medio del monitoreo, obtenemos el estado actual del sistema, que estima condiciones que se tienen en ese momento sobre el motor de combustión. Se hacen lecturas del comportamiento de las vibraciones, temperatura y presión del aceite, estos resultados iguales a los que se tienen en un estado óptimo del sistema derivado de la RC.
- El modelo RC representa la estructura de interacción de los elementos que integran el sistema, describiendo de esta forma su comportamiento. Al aplicar el esquema de detección activo de fallas, se procederá a obtener resultados a través de los cuales se podrán especificar las aplicaciones factibles.

### **Monitoreo de fallas del sistema de combustión interna**

En esta sección se implementa el esquema de diagnóstico de fallas propuesto para monitorear fallas en sensores de temperatura, presión y vibración del sistema de combustión interna. Se creó una interfaz gráfica en “LabVIEW” y utilizó un micro controlador tipo “Arduino” para la comunicación, lectura y exhibición de datos de los sensores del sistema de combustión interna monitoreado.

La función que tiene cada espacio de la aplicación es detectar las fallas que se presentan en el sistema, para lograr esto, es necesario tener los parámetros máximos y mínimos de las variables de temperatura, presión y vibraciones (los parámetros dependen directamente del motor que se esté utilizando, es decir lo que el fabricante nos indique como parte de sus características particulares). Estos parámetros se obtuvieron de la *data sheet* obtenida, correspondientes al motor utilizado durante la investigación.

Los datos necesarios para la interfaz se obtienen de un sensor de temperatura y un giroscopio; un giroscopio mide los movimientos de un dispositivo con un brazo de accionamiento, esto ayuda a calcular la velocidad angular. Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o

electrónico. Dichos sensores son implementados para medir los datos reales el sistema, conocer su condición óptima e identificar un estado de falla dentro del sistema. Estos datos se exhiben en la pantalla como gráficas, las cuales al momento de salirse de los límites inferior y superior nos indican con un indicador visual (led de color rojo), que se está presentando una falla en el sistema.

En la figura 8 se presenta la interfaz para monitorear el sistema y obtener los datos de fallas del motor de combustión interna para cada una de las variables analizadas; vibración, temperatura y presión de aceite. En la figura 9 se muestra el esquema de la interfaz para el monitoreo de fallas en el sistema de combustión, misma que representa como están conectados los sensores que monitorean el comportamiento del mismo.

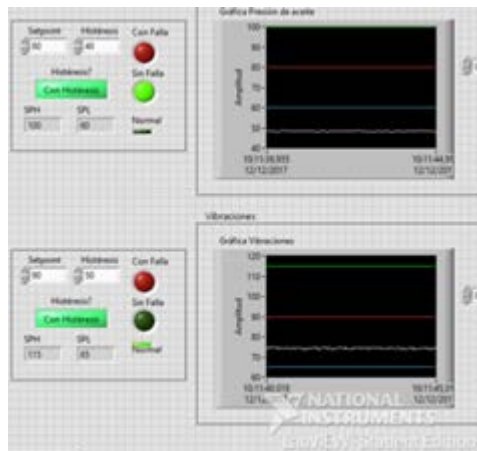


Figura 8 Interfaz para el monitoreo de fallas del sistema de combustión interna.

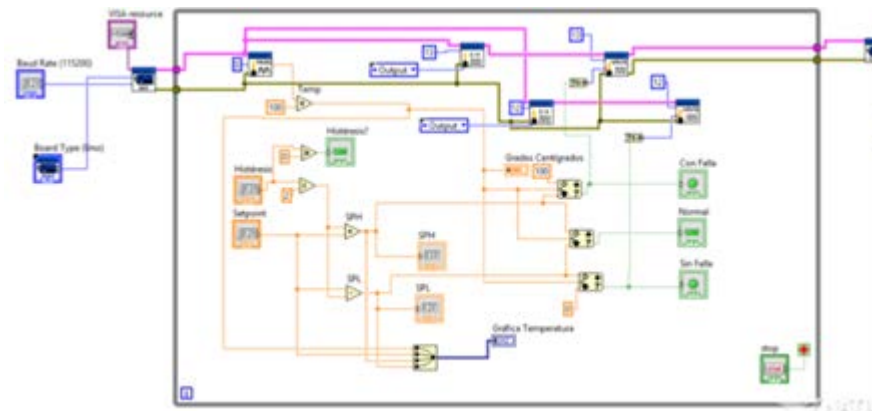


Figura 9 Esquema de conexión de la interfaz.

En la figura 10 muestra el espectro que se obtiene al monitorear fallas por temperatura en el sistema, dando un límite superior y un límite inferior como medidas máximas y mínimas de temperatura que alcanza el sistema dentro y fuera de una detección de fallas, a esto se le conoce como Setpoint e histéresis estos nos ayudan a tener delimitados los rangos (por el fabricante) ya determinados y que a su vez no vas a ayudar a identificar si estamos dentro de una falla o un estado óptimo en el sistema.

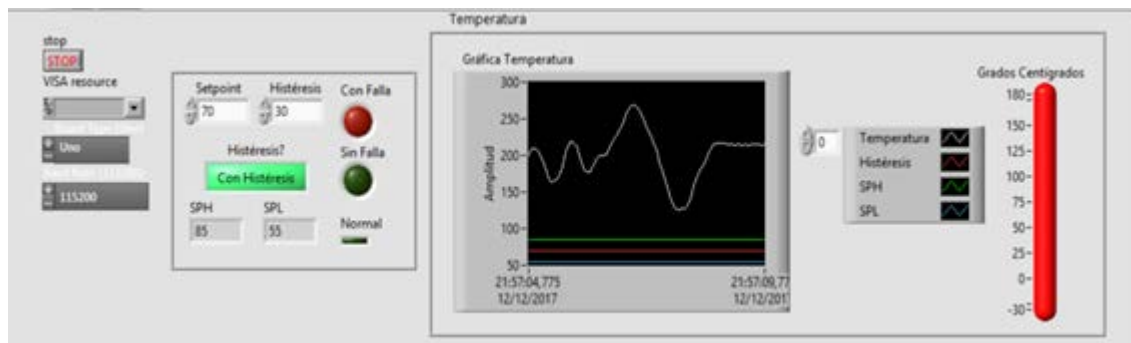


Figura 10 Gráfica de temperatura del sistema.

Para poder identificar o provocar fallas relacionadas con la presión del aceite en el sistema, es importante conocer los límites máximo y mínimo del mismo, de esta forma, se relacionan las fallas de temperatura con las de presión, ya que, si bien es conocido, un motor de combustión interna para funcionar de forma correcta requiere cierta lubricación dentro de sí mismo, el sensor mide el valor de presión la variación de la misma y lo convierte en una señal eléctrica. La señal eléctrica indica el valor de presión recibida.

En la figura 11, se muestra el espectro de la presión de aceite obtenido de nuestro controlador para recibir los datos del comportamiento del sistema, el cual se le asignó su Setpoint e Histéresis con respecto a las características del sistema. En dicha figura se muestra la presión de aceite con la que está trabajando el sistema, como han sido sus variaciones y en qué momentos se ha presentado alguna falla, se pueden apreciar los límites máximos y mínimos que se tienen considerados para esta variable y así conocer cuál es el rango para estar dentro de un buen funcionamiento.

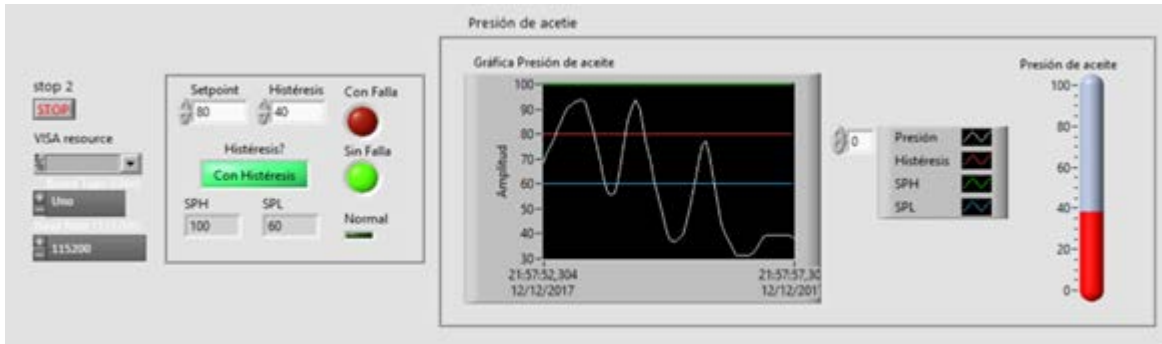


Figura 11 Gráfica de presión de aceite del sistema.

Por último, tenemos los resultados de fallas por vibración, mostrados en la figura 12, es importante mencionar que un motor de combustión interna tiene por sí mismo cierta vibración al momento de estar encendido, por lo cual es importante conocer ese registro para evitar analizar datos de forma errónea; esto no quiere decir que nuestros datos sean falsos, sino que es importante tomar en cuenta la vibración natural que presenta el sistema y no confundirla con alguna falla o avería que se pudiera estar presentando.

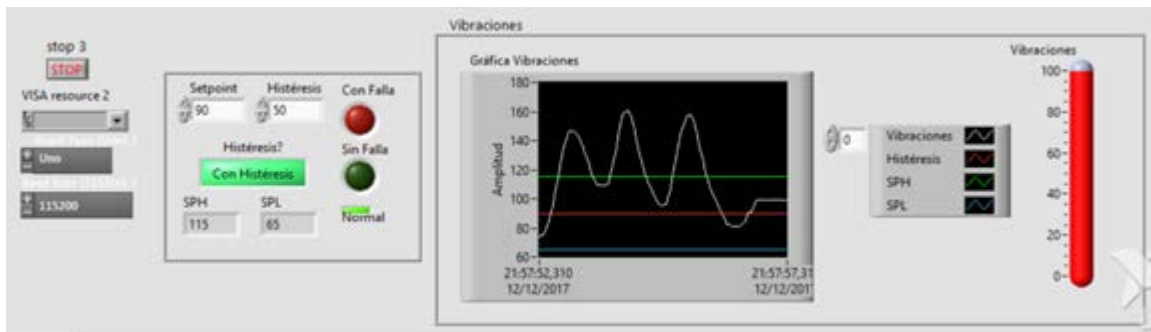


Figura 12 Gráfica de vibraciones del sistema.

### 3. Resultados

Se analizaron las propiedades del modelo en red compleja del sistema de combustión, las cuales fueron: el grado promedio de la red  $\langle K \rangle$ , el segundo momento de la distribución  $\langle K^2 \rangle$  así como la distribución de grado  $P_k$ ; con lo cual se aproximó este grado de distribución a una ley de potencia. Dando un valor de  $\gamma = 3.43$  haciendo que el sistema se comporte como un mundo pequeño o “Small

World". Es decir, que en esta red existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala o "Scale Free" pero estos nodos concentradores ("hubs") no están lo suficientemente interconectados con la red compleja para tener un impacto en la distancia e influencia entre los nodos. Por lo que se infiera que el sistema no es susceptible a fallas desconocidas, pues los parámetros de medición dependen completamente de características específicas del mismo. Por tal motivo, el sistema no falla por completo, se degrada el funcionamiento únicamente.

El esquema de monitoreo propuesto, tiene como ventaja conocer el comportamiento interno en tiempo real de nuestro sistema, ya que si bien, aunque en el tablero de un vehículo se exhiben ciertos datos, los que se analizaron con este enfoque son desconocidos por el usuario. Desde el formalismo de redes complejas se modela la parte operativa del motor de combustión interna. El esquema que se propone, implementan un sistema de monitoreo al adquirir las señales del comportamiento del motor, con el propósito de detectar y localizar fallas en el mismo. El sistema de monitoreo fue desarrollado en LabVIEW™, y para la adquisición de señales, se diseñó y construyó el hardware (sistema electrónico) necesario para el acondicionamiento y filtrado de señales de interés.

#### **4. Discusión**

Con base a los resultados se verifica que, con las redes complejas, se requiere conocer el comportamiento del sistema, visualizar el mismo en diferentes escenarios, plantear situaciones en las cuales sistema falle de manera inesperada por si solo; o bien, por un ataque provocado al mismo. Es importante tomar en cuenta todos los componentes que integran el sistema e identificar la importancia que tiene dentro del mismo y como se relaciona con los demás. Al implementar el uso de LabVIEW validamos la detección de fallas en el sistema de combustión.

#### **5. Conclusiones**

Se analizaron las propiedades del modelo en red compleja del sistema de combustión, las cuales fueron: el grado promedio de la red  $\langle K \rangle$ , el segundo

momento de la distribución  $\langle K^2 \rangle$  así como la distribución de grado  $P_k$ ; con lo cual se aproximó este grado de distribución a una ley de potencia. Dando un valor de  $\gamma = 3.43$  haciendo que el sistema se comporte como un mundo pequeño o “Small World”. Es decir, que en esta red existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala o “Scale Free” pero estos nodos concentradores (“hubs”) no están lo suficientemente interconectados con la red compleja para tener un impacto en la distancia e influencia entre los nodos. Por lo que se infiera que el sistema no es susceptible a fallas desconocidas, pues los parámetros de medición dependen completamente de características específicas del mismo. Por tal motivo, el sistema no falla por completo, se degrada el funcionamiento únicamente.

El esquema de monitoreo propuesto, tiene como ventaja conocer el comportamiento interno en tiempo real de nuestro sistema, ya que si bien, aunque en el tablero de un vehículo se exhiben ciertos datos, los que se analizaron con este enfoque son desconocidos por el usuario. Desde el formalismo de redes complejas se modela la parte operativa del motor de combustión interna. El esquema que se propone, implementan un sistema de monitoreo al adquirir las señales del comportamiento del motor, con el propósito de detectar y localizar fallas en el mismo. El sistema de monitoreo fue desarrollado en LabVIEW™, y para la adquisición de señales, se diseñó y construyó el hardware (sistema electrónico) necesario para el acondicionamiento y filtrado de las señales de interés.

## **6. Bibliografía y referencias**

- [1] N. Mark, A.-L. Barabási y. D. J. Watts, *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton: Princeton University Press and copyrighted, 2006.
- [2] J. Reyes Luevano, E. Ruiz Beltrán y L. Castañeda Ramos, *Structural Analysis and Fault Detection on Manufacturing Systems: a Complex Networks Approach*, IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2017). 2017.



- [3] J. Reyes Lúevano, E. Ruiz Beltrán , L. A. Castañeda Ramo y J. L. Orozco Mora , Detección y Aislamiento de Fallas en Sistemas de Manufactura desde el Enfoque de Redes Complejas, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 00, pp. 1-12, 2018.
- [4] S. V. Buldyrev, R. Parshani, P. Gerald, H. E. Stanley y H. Shlomo, Catastrophic cascade of failures in interdependent networks, *letters*, vol. 464, n° doi: 10.1038/nature08932, pp. 1025-1028, 2010.
- [5] J. Shao, S. v, V. Buldyrev, H. Shlomo y E. H. Stanly, Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations, *Physical Review*, n° 83, pp. 036116-1 - 036116-9, 2011.
- [6] S. Z., Q. H. y D. W., Application of Neutral Network to Automobile Engine Failure Detecting, de *The Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2008)*, China, 2008.
- [7] Aleksandar Vencl, Diesel Engine Crankshaft journal bearings failures: case study, *ELSEVIER*, vol. 44, pp. 217-228, 2014.
- [8] Albert-Laszló Barabási, *Network Science*, United Kingdom, Cambridge University Press, 2016.
- [9] B. M., H. S. y J. M., Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 2009: <https://gephi.org/users/publications/>.
- [10] Math works, Math work, The Math Works, Inc., 1994-2016: [es.mathworks.com](http://es.mathworks.com).
- [11] The power portal. Com: <http://www.briggsandstratton.com/~media/frequently%20asked%20questions/engine/pdfs/replacement%20engine%20specifications/horizontal%20shaft/145%20b%20gt%20horiz.pdf>.

# **APLICACIÓN MÓVIL PARA EL APOYO EN EL ESTUDIO ANATÓMICO DEL ROSTRO CON REALIDAD AUMENTADA**

*MOBILE APPLICATION FOR SUPPORTING THE ANATOMIC STUDY OF THE FACE WITH AUGMENTED REALITY*

**Leonardo Sánchez**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ldsm@correo.azc.uam.mx*

**José A. Reyes Ortiz**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*ceca@xanum.uam.mx*

**Alan Garza Ángeles**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*alang.zerex@gmail.com*

## **Resumen**

La realidad aumentada ha tenido gran auge en los últimos años. La cantidad de aplicaciones que incorporan realidad aumentada se ha incrementado gracias a su potencial y a la cantidad de dispositivos móviles disponibles. Hoy en día, existen diversas actividades que se pueden apoyar con el uso de esta tecnología, siendo la educación una de las más representativas gracias al impacto de su contribución a la sociedad. En este trabajo, se presenta el desarrollo de una aplicación móvil que busca apoyar a la educación de los futuros estudiantes de medicina y ciencias de la salud en el aprendizaje de la anatomía humana. Nuestra aplicación está centrada en el rostro humano y en los diversos sistemas anatómicos que lo componen. El desarrollo de la aplicación se realizó utilizando Unity y el kit de desarrollo Vuforia. Nuestros resultados muestran una aplicación funcional y atractiva para el aprendizaje de la anatomía humana.

**Palabras Claves:** Aplicaciones para dispositivos móviles, desarrollo de sistemas, realidad aumentada.

## **Abstract**

*The augmented reality has had great boom in recent years. The number of applications that incorporate augmented reality has increased thanks to its potential and the number of mobile devices available. Currently, there are several activities that can be improved with the use of this technology, being the education one of the most benefited. In this work, we present the development of a mobile application that seeks to help to future students in medicine and health field. The goal of such application is to facilitate the learning of human anatomy. Our application is focused on the human face and in some of the several anatomy systems that make it up. The development of the application was done using Unity and the Vuforia development kit. Our results show a functional and attractive application for the learning of human anatomy.*

**Keywords:** *Applications for mobile devices, augmented reality, systems development.*

## **1. Introducción**

El uso de dispositivos móviles se ha incrementado en los últimos años. Se estima que para noviembre del año 2016 se contabilizaban un total de 7,500 millones de teléfonos móviles, siendo el 80% teléfonos inteligentes, 10% más respecto al del año anterior [Ericsson, 2016]. Esto muestra un aumento en el uso de dispositivos móviles, así como un claro aumento en la demanda y desarrollo de aplicaciones para este tipo de tecnología. Gracias a esto, los teléfonos inteligentes o *smartphones* han revolucionado la forma en que las personas interactúan con la tecnología, ya que estos además de su capacidad de comunicación, incluyen otros elementos como cámara fotográfica, capacidades de almacenamiento para archivos y aplicaciones, capacidades de procesamiento, así como diversos sensores que permiten a las aplicaciones interactuar con el entorno del dispositivo. Por otro lado, el desarrollo tecnológico no es único de los teléfonos inteligentes, sino también de otros tipos de dispositivos móviles como las tabletas. Estas funcionan como el punto intermedio entre los *smartphones* y las computadoras personales, contando con la movilidad característica de los primeros, pero aportando también

las mejoras de las segundas. La importancia de esto radica en que a medida que avanza la tecnología en el ámbito del hardware, la experiencia del usuario cambia con esta, surgiendo así nuevas formas de aprovechar sus beneficios por medio del desarrollo de software.

Una de las tecnologías aplicadas al desarrollo de aplicaciones móviles con mayor auge en la actualidad es la realidad aumentada<sup>1</sup>, la cual extiende la percepción del usuario en cuanto a lo que este puede observar con ayuda de la pantalla del dispositivo. Dicha tecnología irá en ascenso de acuerdo con la tendencia del desarrollo tecnológico, ya que gracias a la mejora en procesamiento gráfico y la manera en la que ésta se presente al usuario, se mejorará la experiencia del usuario al lograr una mayor inmersión [Gglassday,2016].

Hoy en día, la mayoría de las aplicaciones de realidad aumentada se encuentran enfocadas al entretenimiento, no obstante, el uso de esta ha ido poco a poco abarcando un mayor número de áreas como lo son la publicidad, la mercadotecnia y la educación. Esta última tiene un gran potencial de aplicación, ya que al poder utilizar los beneficios inmersivos que otorga la tecnología se apoya el proceso de aprendizaje de los estudiantes. En particular, los estudiantes de medicina son un sector que se ha visto ampliamente beneficiado por el uso de programas de simulación multimedia, ya que han favorecido al proceso de enseñanza y aprendizaje [Narváez, 2014]. Uno de los campos con mayor auge en los últimos años es la medicina, siendo la anatomía una de las disciplinas involucradas más recurrentes en este tipo de tecnologías [Virtualama, 2014]. Dicha disciplina es de suma importancia para los estudiantes de este campo debido a que suministra al estudiante una serie de conocimientos, habilidades y actitudes que le serán esenciales para el futuro ejercicio de su profesión [Sañudo, 2007]. Adicionalmente, esta representa un reto para los estudiantes que cursan dicha profesión por lo extenso de su contenido, lo que deriva en la necesidad de aplicaciones que contribuyan al reforzamiento del aprendizaje del alumno.

---

<sup>1</sup> La Realidad Aumentada (AR) consiste en sobreponer objetos o animaciones generadas por computadora sobre la imagen en tiempo real que recoge una cámara de un dispositivo. Es una tecnología que complementa la percepción e interacción con el mundo real y permite al usuario estar en un entorno aumentado con información generada por una computadora. [Centro de Difusión de Ciencia y Tecnología,2018]

Actualmente, la realidad aumentada ya ha demostrado ser una herramienta aplicable en el campo del aprendizaje, tal es el caso de la herramienta diseñada en [Cano, 2013]. Por otro lado, ya existen diversas herramientas que contribuyen al aprendizaje de la anatomía humana mediante modelos tridimensionales, como la presenta en [Goodwill Enterprise, 2013], sin embargo, este tipo de herramientas no implementan realidad aumentada ni reconocimiento de elementos relacionados al entorno del usuario. Finalmente, existen un sinnúmero de aplicaciones que permiten reconocer objetos del mundo real y realizar acciones con base en dicha identificación [Ramírez, 2014], [Morales, 2014], pero ninguna que integre realidad aumentada con el estudio de la anatomía.

Así, en este trabajo se presenta el diseño e implementación de una aplicación móvil con realidad aumentada aplicada a un rostro. La aplicación es capaz de tomar la imagen de un rostro en dos dimensiones y transformarla en un modelo tridimensional con el que el usuario puede interactuar por medio del uso de tecnologías de realidad aumentada. De esta manera, la herramienta desarrollada en este trabajo busca complementar el aprendizaje de los estudiantes de medicina y carreras afines utilizando un modelo completamente computarizado. La aplicación desarrollada en este trabajo resulta en una herramienta atractiva para el usuario final, ya que le permite adquirir y reafirmar conocimientos de una manera novedosa.

## **2. Métodos**

Existen varias formas de aproximarse al estudio de la anatomía humana [Gray, 2015]:

- *Anatomía sistemática o descriptiva*: Estudia y sigue cada sistema a través de todo el cuerpo. Fracciona al cuerpo humano y lo organiza por sistemas y aparatos.
- *Anatomía artística*: Se enfoca en el estudio de las cuestiones anatómicas que afectan directamente a la representación artística de la figura humana.
- *Anatomía clínica*: Se enfoca en el funcionamiento y correlación de los elementos que conforman al cuerpo humano.

- **Anatomía regional o topográfica:** Estudia cada región del cuerpo por separado y todos los aspectos de dicha región se estudian al mismo tiempo.

En este trabajo nos enfocamos en la aproximación basada en la anatomía regional. Bajo este enfoque, el cuerpo humano se divide en regiones esquemáticas como cabeza, cuello, tronco, miembros superior e inferior. A su vez, cada región se divide en componentes que se estudian al mismo tiempo.

De este modo, es posible seccionar elementos de los diversos sistemas y aparatos que conforman al cuerpo, simplificando y esquematizando el estudio del mismo. En particular, la jerarquización de los huesos y músculos que conforman el área de la cabeza, como se muestra en las figuras 1 y 2, son de interés para el desarrollo de la aplicación propuesta.

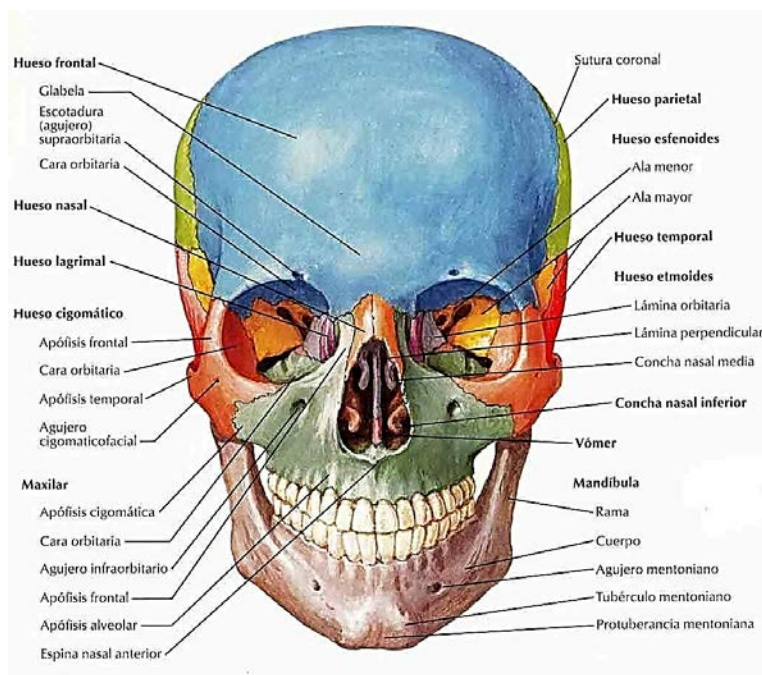


Figura 1 Sección de la cabeza del sistema óseo [Anatomía-Humana, 2000].

Por otro lado, la realidad aumentada ha encontrado en los dispositivos móviles una plataforma propicia para el aprovechamiento de ésta. Los dispositivos móviles cuentan con los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la realidad aumentada, así como la portabilidad y practicidad necesaria para dar

soporte completo a este tipo de tecnología. Aunado a esto, Android, siendo el sistema operativo líder en dichos dispositivos, es una plataforma de gran importancia para el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada al contar con distintas librerías y herramientas de desarrollo de licencia libre. Un claro ejemplo de ello es el trabajo presentado en [Vicente, 2014], en el que se desarrolla una aplicación que permite convertir un plano de una casa en un modelo 3D.

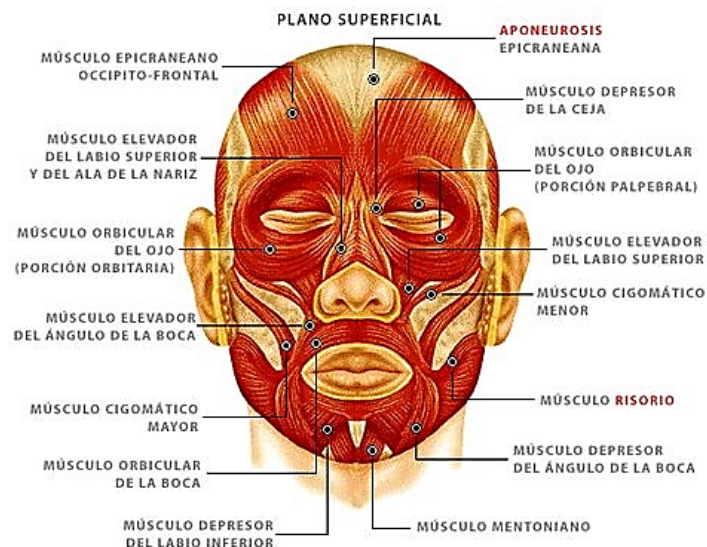


Figura 2 Sección de la cabeza del sistema muscular [Pinterest, 2005].

Por otro lado, la realidad aumentada ha encontrado en los dispositivos móviles una plataforma propicia para el aprovechamiento de ésta. Los dispositivos móviles cuentan con los elementos necesarios para el correcto funcionamiento de la realidad aumentada, así como la portabilidad y practicidad necesaria para dar soporte completo a este tipo de tecnología. Aunado a esto, Android, siendo el sistema operativo líder en dichos dispositivos, es una plataforma de gran importancia para el desarrollo de aplicaciones de realidad aumentada al contar con distintas librerías y herramientas de desarrollo de licencia libre. Un claro ejemplo de ello es el trabajo presentado en [Vicente, 2014], en el que se desarrolla una aplicación que permite convertir un plano de una casa en un modelo 3D.

Por su parte, Vuforia es el kit de desarrollo de software de realidad aumentada para dispositivos móviles más utilizado a nivel mundial. Vuforia utiliza tecnología de

visión por computadora para realizar el reconocimiento de imágenes planas y objetos 3D simples como cajas y cilindros. Con ayuda de esto, es posible desarrollar aplicaciones que posicionen y orienten objetos virtuales en el entorno del mundo real que es capturado por la cámara del dispositivo móvil [Vuforia, 2017]. Vuforia ofrece tres herramientas de operación para generar realidad aumentada:

- *Vuforia Object Scanner*: ayuda escanear objetos 3D en un formato compatible para el motor Vuforia.
- *Target Manager*: Aplicación web en el portal de desarrollo que permite crear bases de datos de los objetivos a escanear en la nube. Como se muestra en la figura 3, al subir una imagen, la herramienta reconoce los puntos significativos de ésta los cuales permitirán realizar el reconocimiento, añadiéndole un nivel de “aumentabilidad” que indica la facilidad con la que podrá realizar el reconocimiento de dicha imagen.
- *Calibration Assistant*: Permite a los usuarios finales crear perfiles personalizados que se adapten a la geometría del objetivo.

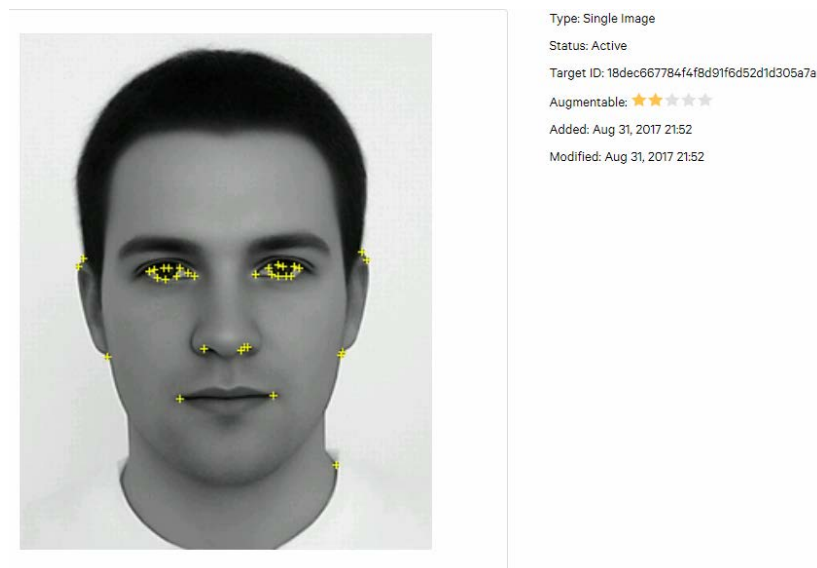


Figura 3 Puntos elegidos por el Target Manager y nivel de aumentabilidad.

A su vez, Unity es un motor gráfico para creación de videojuegos multiplataforma que permite agregar las herramientas de Vuforia para el desarrollo de aplicaciones



de realidad aumentada de forma simple. Unity es notable por su capacidad multiplataforma, lo cual lo vuelve una gran opción para el desarrollo de aplicaciones y videojuegos. Así, para el desarrollo de la aplicación propuesta se seleccionaron y utilizaron los elementos de hardware y software que se mencionan a continuación.

## **Hardware**

Computadora con los siguientes requerimientos:

- OS: Windows 7 SP1+, 8, 10, 64-bit versions only; Mac OS X 10.9+.  
Windows XP y Vista no son compatibles.
- CPU: Soporte para el conjunto de instrucciones SSE2.
- GPU: Tarjeta gráfica con DX9 (modelo de shader 3.0) o DX11 con capacidades de funciones de nivel 9.3.

Requisitos adicionales para el desarrollo de plataformas:

- iOS: Computadora Mac con sistema operativo versión OS X 10.9.4 como mínimo y Xcode 7.0 o superior.
- Android: Android SDK y Java Development Kit (JDK); IL2CPP scripting backend requiere Android NDK.
- Windows Store: Windows 8.1 (64 bits) y Visual Studio y plataforma SDK correspondiente:
- Universal Windows Platform (UWP): Windows 8.1 (64 bits), Visual Studio 2015 o posterior y Windows 10 SDK;
- El scripting backend IL2CPP también requiere la instalación de la función de compilador C++ con Visual Studio.

En cuanto al dispositivo móvil, se requiere que este cuente con giroscopio con el fin de poder ejecutar aplicaciones de realidad aumentada. Esto se debe a que gracias a este sensor es posible que el dispositivo conozca en qué plano del espacio se encuentra, cuál es su aceleración con respecto al punto de partida y si el dispositivo está girando sobre el plano o inclinándose, es decir, detecta el

movimiento en sus seis ejes. Esto permite que en tecnologías como la realidad virtual y aumentada sea posible cuadrar la imagen en pantalla con la posición y movimiento del usuario. El funcionamiento del giroscopio se puede observar en la figura 4.

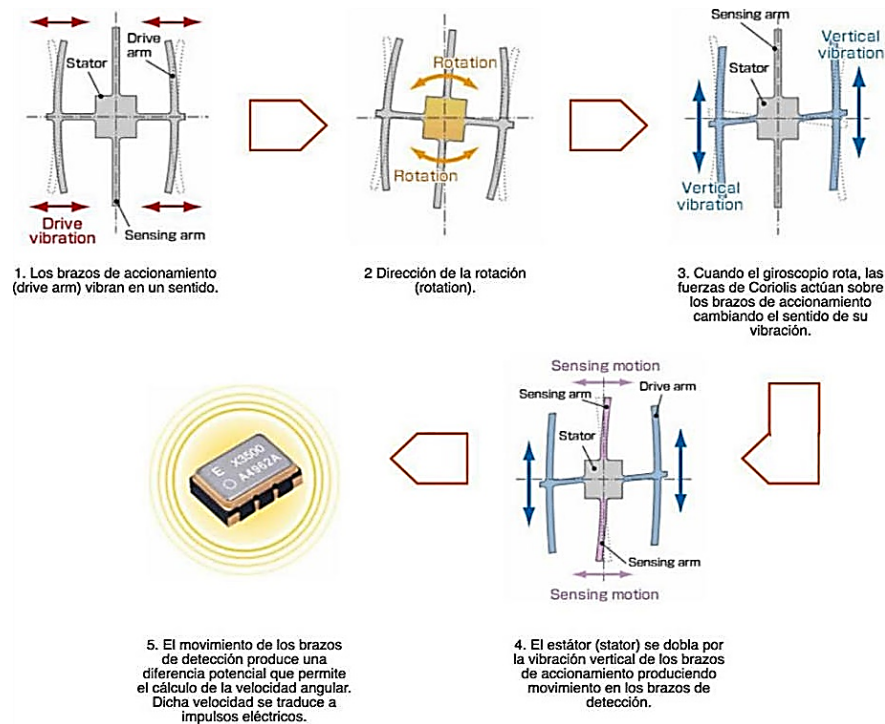


Figura 4 Funcionamiento del giroscopio dentro de un dispositivo móvil [Android 2018].

## Software

Para el desarrollo de la aplicación se utiliza el motor gráfico Unity versión 5.6.2 junto con el kit de desarrollo Vuforia versión 6.2.10 para Unity. En cuanto al desarrollo de modelos tridimensionales se utiliza el software Autodesk Maya 2018. A su vez, para el desarrollo de los scripts en lenguaje C# que permiten la interacción con los modelos tridimensionales, se utiliza el entorno de desarrollo integrado Visual Studio 2015.

## Desarrollo

La aplicación se visualiza como un conjunto de módulos interconectados, los cuales requieren una entrada y proveen una salida. A excepción del primer módulo,

la entrada de un módulo es la salida del anterior, tal y como se observa en la figura 5. Para el correcto funcionamiento de la aplicación se generó una base de datos en la nube de Vuforia con una imagen preprocesada en ella, la cual determinará al conjunto de imágenes válidas.



Figura 5 Diagrama de bloques de los módulos que conforman la aplicación móvil.

El módulo de detección de rostro es el primer componente interno de la aplicación. Se conforma por los elementos de entrada del dispositivo móvil que permiten capturar valores del entorno del usuario y el entorno del usuario. En particular, para el desarrollo de esta aplicación se utiliza la cámara del dispositivo móvil y una imagen preprocesada. Por medio de este módulo, el usuario es capaz de detectar si la imagen introducida es una imagen válida o no. Esto significa que la aplicación verifica que la imagen exista en la base de datos creada en la nube.

Por otro lado, el módulo de extracción de información es el responsable de recibir la información obtenida por el módulo de detección de rostro. Una vez que el módulo de detección de rostro ha determinado que se tiene una entrada válida para la aplicación, el módulo de extracción de información se encarga de recuperar el número de bordes y relieves de la imagen, los cuales definen las dimensiones y características específicas de un rostro en particular. El resultado es un plano con bordes y relieves. Por su parte, el módulo de transformación es el encargado de convertir el plano de bordes y relieves a una imagen tridimensional, para lo cual toma como entrada los datos entregados por el módulo de extracción de información y los extrapola para determinar las características de la imagen. Dicha imagen contempla tres modelos tridimensionales, cada uno relacionado con uno de los tres sistemas que integran al rostro humano [Gray, 2015]:

- Sistema tegumentario: Conformado de la piel, vellos y uñas.
- Sistema muscular: Formado por los diversos músculos del cuerpo que permiten el movimiento del mismo.
- Sistema óseo: Integrado por los diversos huesos en el cuerpo, proporcionan apoyo estructural y protección a los órganos.

Los modelos tridimensionales están basados en los elementos principales de las figuras 1 y 2, es decir, en el conjunto de elementos de mayor jerarquía que conforman a cada uno de los sistemas. A su vez, el módulo de realidad aumentada se encarga de agregar información adicional al modelo tridimensional generado por el módulo de transformación. La información se agrega de manera superpuesta de modo que el modelo contiene información detallada de cada parte del mismo. Finalmente, el módulo de interacción con el usuario permite al usuario interactuar con el modelo tridimensional durante tiempo de ejecución. Esto quiere decir, que una vez que el objeto tridimensional se visualiza en pantalla, el usuario es capaz de realizar diversas acciones sobre los elementos que conforman al modelo. Esto implica que el usuario, a través de este módulo, puede acceder a cualquiera de los modelos tridimensionales relacionados con el rostro humano y a su respectiva información. La figura 6 muestra la manera en la que el usuario interactuará con la aplicación a través de diversas vistas, mientras que la figura 7 muestra los tres modelos tridimensionales considerados para el desarrollo de esta aplicación.

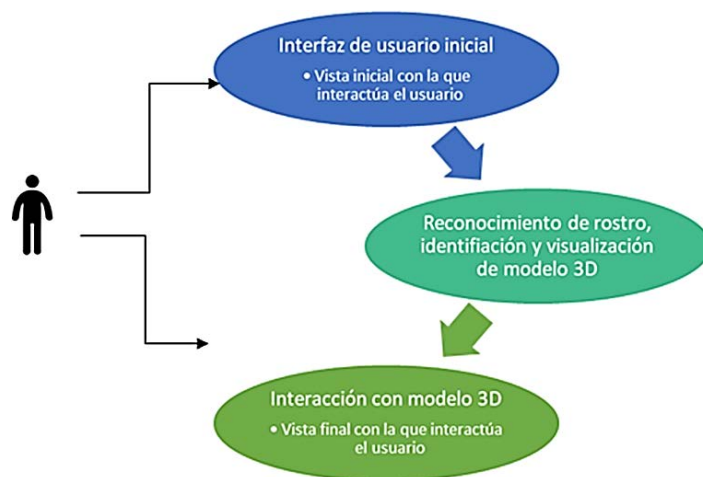


Figura 6 Interacción del usuario con las vistas de la aplicación.

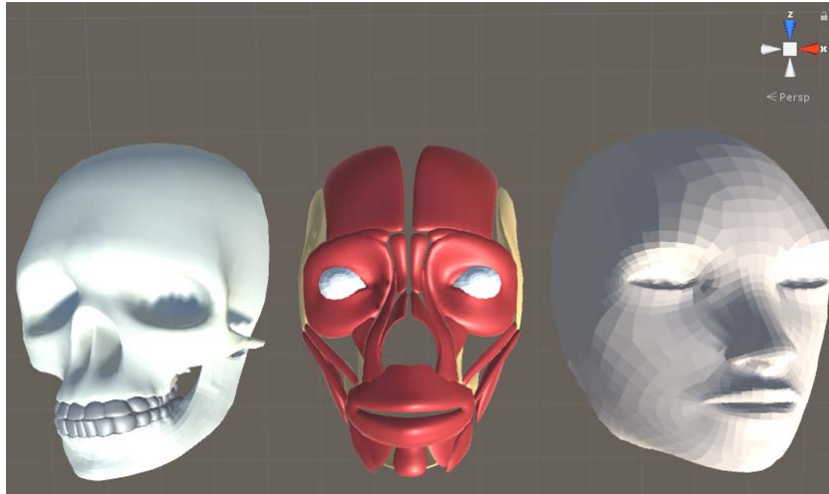


Figura 7 Modelos tridimensionales.

En figura 7 de izquierda a derecha: sistema óseo, el sistema muscular y el sistema tegumentario de un rostro. Como se puede apreciar, los modelos diseñados para la aplicación están basados completamente en los elementos presentados en las figuras 1 y 2.

### **3. Resultados**

La aplicación es capaz de identificar una imagen almacenada en la base de datos que proporciona Vuforia. Dicha base se puede ampliar agregando imágenes distintas o la misma imagen desde distintos ángulos o con distintas exposiciones de luz. Una vez identificada una imagen válida, la aplicación es capaz de generar un modelo tridimensional con información basado en los tres sistemas que integran al rostro humano, es decir, es capaz de agregar los elementos de realidad aumentada sobre esta. La imagen elegida y los puntos característicos para el reconocimiento de ésta se pueden apreciar en la figura 8. Se eligió esta imagen debido a su simetría, lo que facilitó colocar los elementos tridimensionales sobre el rostro permitiendo cierta continuidad y naturalidad entre los elementos.

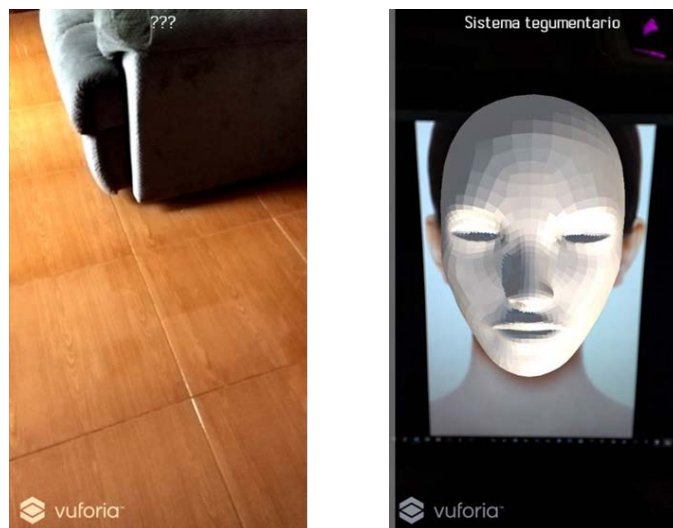
A pesar de que el nivel de aumentabilidad que nos proporciona la base de datos de Vuforia respecto a la imagen es muy bajo (de sólo una estrella), el reconocimiento por parte de la aplicación se realiza de forma rápida en la mayoría de los casos.



Figura 8 Imagen para reconocimiento y puntos característicos elegidos por Vuforia.

La primera vista de la aplicación se presenta en la figura 9a, que es la vista inicial del sistema en la que no se ha hecho el reconocimiento de la imagen objetivo. En esta, el usuario visualiza su entorno junto con tres signos de interrogación en la parte de arriba a través de la cámara del dispositivo móvil. Los tres signos indican que no se ha reconocido ningún objeto. La figura 9b muestra la vista en la que se ha hecho el reconocimiento de la imagen objetivo.

Al momento que la cámara enfoca la imagen objetivo, se avanza a la siguiente vista de la aplicación donde ya se encuentran los elementos de realidad aumentada agregados sobre la imagen objetivo, como se muestra en la figura 10.



a) Vista inicial sin reconocimiento. b) Vista con reconocimiento.

Figura 9 Vistas sin y con reconocimiento.

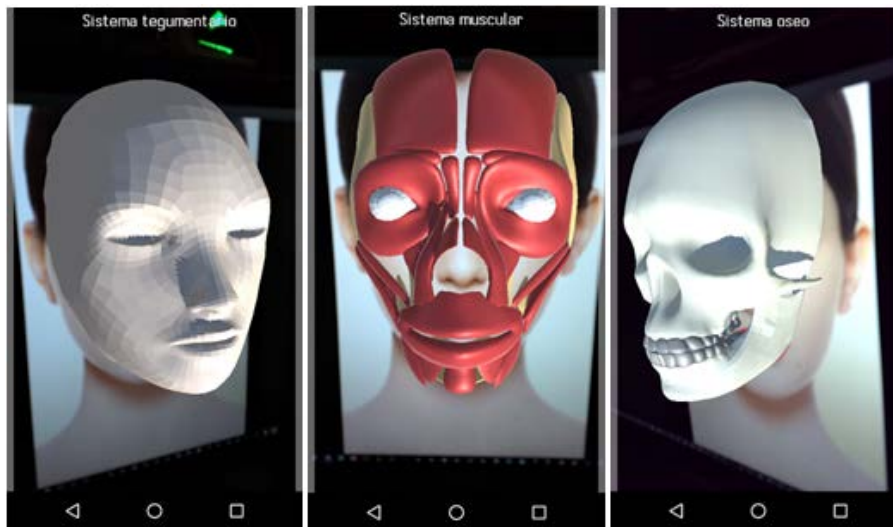


Figura 10 Vista de los tres sistemas que conforman el rostro humano.

Estos elementos serán visibles siempre que se mantenga la cámara enfocada sobre la imagen, de lo contrario se regresará a la vista de la figura 9b. En la vista con los elementos superpuestos, el usuario puede navegar entre los tres sistemas disponibles por medio de *swipes*. En cada sistema, se muestra el nombre de este junto con los elementos que lo componen, como se muestra en figura 10. Al seleccionar uno de estos elementos por medio de un *touch* sobre la pantalla, el elemento se aislará y mostrará con información de este en la parte inferior, tal y como se puede apreciar en la figura 11.

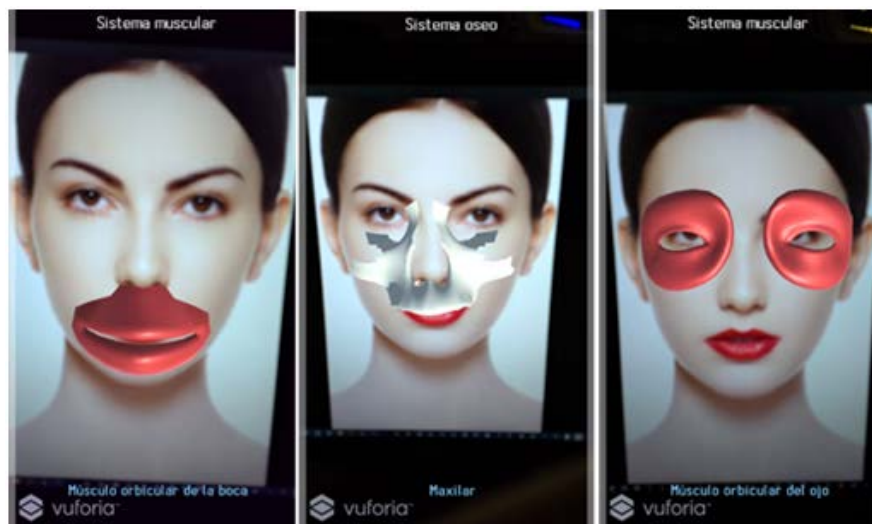


Figura 11 Ejemplos de selecciones de elementos de los sistemas disponibles.

#### **4. Discusión**

Los resultados muestran un buen funcionamiento de la aplicación, ya que a partir de una imagen preprocesada en dos dimensiones, se obtiene una imagen tridimensional en la que se presentan los tres sistemas involucrados en el rostro humano. Además, la aplicación permite al usuario:

- Seleccionar diversos sistemas anatómicos del modelo tridimensional, así como aislar elementos de cada sistema y conocer información adicional acerca del elemento seleccionado.
- Redimensionar el modelo y observar distintas perspectivas de éste al momento de mover el dispositivo hacia la dirección deseada.
- Funcionar de manera fluida y optimizada durante su ejecución en el dispositivo móvil.

Por otro lado, los módulos planteados en el diseño del sistema cumplen con su función, ya que:

- El módulo de detección de rostro reconoce objetos que en efecto representan un rostro a partir de una imagen preprocesada.
- El módulo de extracción de información permite obtener toda la información relacionada a un rostro a partir de una imagen.
- El módulo de transformación es capaz de generar un modelo tridimensional a partir de datos específicos.
- El módulo de realidad aumentada agrega información a un modelo tridimensional.
- El módulo de interacción permite realizar, de forma intuitiva para el usuario, las acciones de selección, movimiento y redimensionamiento de un modelo tridimensional.

Por el momento, es difícil afirmar que la aplicación cumple con el objetivo de mejorar el aprendizaje de la anatomía humana sin realizar antes un estudio estadístico probando la aplicación en estudiantes de ciencias de la salud. Así mismo, se pueden agregar más elementos a la aplicación con el fin de hacerla más



robusta. Se puede mejorar la aplicación para que permita mantener el modelo tridimensional aun cuando la imagen bidimensional salga del enfoque de la cámara. Adicionalmente, se pueden agregar más sistemas a la aplicación e información adicional a los sistemas existentes.

## **5. Conclusiones**

Se ha desarrollado una aplicación móvil con realidad aumentada integrada para el área de anatomía del campo de la medicina. La aplicación desarrollada se enfocó en tres sistemas involucrados en el rostro humano y está orientada a dispositivos móviles con sistema operativo Android.

La aplicación es funcional y adecuada, sin embargo, queda mucho trabajo por hacer. Lo primero es evaluar el aporte de la aplicación a la comunidad estudiantil de carreras afines a la medicina. Por otro lado, existen diversos aspectos de la aplicación que se pueden mejorar. Uno de ellos es incluir más imágenes preprocesadas a la base de datos de Vuforia o incluir un módulo de detección de rostros a través de alguna de las técnicas ya conocidas, como las funciones de Haar. Además, se puede ampliar la información relacionada a los sistemas que conforman el modelo tridimensional. Finalmente, se puede mejorar el módulo de interacción para que el usuario pueda continuar trabajando aun cuando se ha perdido de foco la imagen preprocesada.

El desarrollo de esta aplicación es el principio de lo que puede ser una amplia gama de aplicaciones de esta tecnología en la enseñanza de diversas disciplinas fundamentalmente visuales, ya que esta tecnología permite una mayor inmersión por parte del usuario y aporta elementos de entretenimiento que facilitan e incitan al usuario a continuar con dicha interacción.

Es de gran importancia aprovechar las nuevas tecnologías que la ingeniería nos provee e integrarlas en las distintas disciplinas para realizar proyectos novedosos e innovadores, con el objetivo del beneficio social. La educación, que es una de las ramas más importantes en la sociedad, requiere de constante innovación para facilitar a los estudiantes el aprendizaje de disciplinas complejas y esenciales para su formación como profesionistas.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] A.A. Ramírez Avilés, Sistema de detección y reconocimiento facial multi-hilo sobre GPUs, propuesta de proyecto terminal, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, 2015
- [2] Anatomia-Humana, Todo sobre anatomía, <http://www.anatomia-humana.com/>, 2000.
- [3] Android Libre: <https://elandroidelibre.com/>, 2018
- [4] C. Hipólito Morales, Cerradura electrónica con reconocimiento facial, propuesta de proyecto terminal, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, México, 2014.
- [5] Ericsson, Ericsson Mobility Report, Stockholm, Sweden, <https://www.ericsson.com/>, 2016.
- [6] Gglassday, Google Glass, toda la información, ¿qué es Google Glass? ¿Para qué sirven?, Gglassday, 2016, <http://gglassday.com/>.
- [7] Gray, Anatomía para estudiantes, Drake, Mitchell & Vogl, 3a edición, 2015.
- [8] Goodwill Enterprise, Anatomy 3D–Anatronica, <https://play.google.com/store/apps>, 2013.
- [9] H. E. Narváez, E. I. Murillo Rábago, Herramientas de estudio utilizadas por alumnos de ciencias de la salud en la materia de Anatomía, Revista Investigación en Educación Médica, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México, <http://riem.facmed.unam.mx/>, 2014
- [10] J. Cano Flórez, M. Franco Buriticá, Realidad aumentada aplicada a objetos de aprendizaje para asignaturas de Ingeniería Informática. Tesis, Facultad de Ingenierías, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia, 2013.
- [11] J.R. Sañudo, The participation of Anatomy Departments in the continuing professional development of surgeons, European Journal of Anatomy, vol. 11, sup. 1, pp.111-119, <http://www.eurjanat.com>, 2007.
- [12] L.S. Fernando Vicente, Sistema de realidad aumentada para estrategias de mercadotécnica enfocada a una empresa inmobiliaria, Tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México C.U., México, 2014.

- [13] Microsoft, Microsoft HoloLens, <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>, 2017.
- [14] Pinterest, <https://www.pinterest.com.mx/>, 2005.
- [15] Virtualama, Realidad aumentada aplicada a la medicina, <http://www.virtualama.com/>, 2014.
- [16] Vuforia, Vuforia: Developer Library, <https://library.vuforia.com/>, 2017.

# **TRANSMISIÓN Y RECEPCIÓN DE TEXTO MEDIANTE LUZ VISIBLE DE LEDS Y SENSOR DE LUZ**

## *TRANSMISSION AND RECEPTION OF TEXT USING VISIBLE LIGHT AND A LIGHT SENSOR*

**Sergio Sandoval Reyes**

Instituto Politécnico Nacional  
*sersand@cic.ipn.mx*

### **Resumen**

La comunicación por luz visible o VLC por su acrónimo en inglés (Visible Light Communication), emplea luz proveniente de láseres, o bien de diodos LED (Light Emitting Diode), para transmitir información analógica como audio y video, o digital como texto e imágenes. La VLC puede utilizarse como un medio transmisor ubicuo de información, dado que los dispositivos que producen luz (lámparas de interior/exterior, semáforos de tráfico, anuncios luminosos, faros de vehículos, etc.), se utilizan en todas partes. La transmisión de la información se realiza modulando la intensidad de la luz (la modulación de información digital es más difícil que la analógica). En el receptor la información es inicialmente recobrada a través de un sensor de luz, que suele estar conectado a una computadora y/o microcontrolador para la recuperación final de la información. En este artículo se detalla como aportación, una aplicación basada en VLC para transmitir texto empleando módulos LED y sensor de luz de LittleBits, modulación OOK (On-Off-Keying), y una computadora Raspberry Pi programada en Python. El texto consistió de la frase “Hola Li-Fi”, repetido muchas veces. La transmisión-recepción del texto por luz, sólo se pudo realizar a distancias menores a 10 cm. Se encontró que la intensidad de los LEDs, la sensibilidad del sensor de luz, la alineación entre ellos, así como la luz ambiental, influyen en la recepción de la información.

**Palabras Claves:** OOK, Raspberry Pi, Python, Texto, VLC.

## **Abstract**

*The communication by visible light or VLC by its acronym in English (Visible Light Communication), uses light coming from lasers, or from LED diodes (Light Emitting Diode), to transmit analog information as audio and video, or digital as text and images . The VLC can be used as a ubiquitous transmitter of information, since the devices that produce light (indoor / outdoor lamps, traffic lights, illuminated signs, vehicle headlights, etc.) are used everywhere. The transmission of information is done by modulating the intensity of the light (modulation of digital information is more difficult than analog). In the receiver the information is initially recovered through a light sensor, which is usually connected to a computer and / or microcontroller for the final recovery of the information. In this article, an application based on VLC to transmit text using LED modules and light sensor from LittleBits, OOK (On-Off-Keying) modulation, and a Raspberry Pi computer programmed in Python is detailed. The text consisted of the phrase "Hello Li-Fi", repeated many times. The transmission-reception of the text by light, could only be done at distances less than 10 cm. It was found that the intensity of the LEDs, the sensitivity of the light sensor, the alignment between them, as well as the ambient light, influence the reception of the information.*

**Keywords:** OOK, Raspberry Pi, Text, VLC.

## **1. Introducción**

La comunicación de luz visible (es decir, VLC), [TED, 2011], [Tsonev, 2013] se puede usar para transmitir audio, voz y datos. Utiliza luz láser o luz de diodos emisores (LED) y detectores de luz en los extremos de transmisión y recepción, respectivamente (figura 1). Funciona en la banda óptica de 380 a 780 nm que es luz visible y de ahí el nombre VLC [Sherman, 2013], [Haas, 2013], [Vincent, 2013]. Para transmitir información, esta tiene que estar codificada, y luego la luz tiene que ser modulada y demodulada en los lados del transmisor y del receptor. Luego, la información recibida debe decodificarse y procesarse para recuperarla por completo. El éxito de esta recuperación depende de varios factores, entre ellos:

- El número, la forma y la longitud de onda de los LED empleados.
- El número y tipo de detectores de luz (fotorresistencia, fotodiodo, LED polarizado inversamente, etc.) utilizados.
- El método de codificación (RZ: Return to zero, No-RZ, Polar NRZ, etc.).
- El esquema de modulación (OOK, WPM, VWPM, PPM, OFDM, etc.).
- La sincronización y la distancia entre los LED y el detector de luz. VLC requiere línea de visión entre emisor y receptor [Wikipedia, 2017].

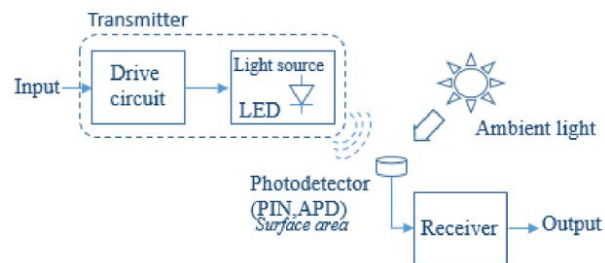


Figura 1 Estructura general de un enlace VLC.

Este artículo describe una aplicación basada en VLC que utiliza la modulación OOK (On-Off Keying) para transmitir texto usando una computadora Raspberry Pi como fuente y destino de datos (para simplificar el problema de sincronización entre el emisor-receptor), Python como lenguaje de programación, y módulos LEDs y sensor de luz de LittleBits, para facilitar la implementación del hardware.

## 2. Métodos

Los sistemas VLC basados en LED generalmente se implementan usando un esquema de modulación de intensidad y detección directa, con una configuración de línea de visión (LOS: Line Of Sight) o canal [Aleksandar, 2013], figura 2. En el transmisor, la modulación de intensidad de la luz se implementa mediante la codificación de la corriente directa que fluye a través del LED (se utilizan frecuencias altas de modulación para evitar el parpadeo).

En el receptor, la señal transmitida se recupera mediante detección directa. En este método simple, se usa un fotodiodo para convertir la potencia de la señal óptica incidente en una corriente proporcional.

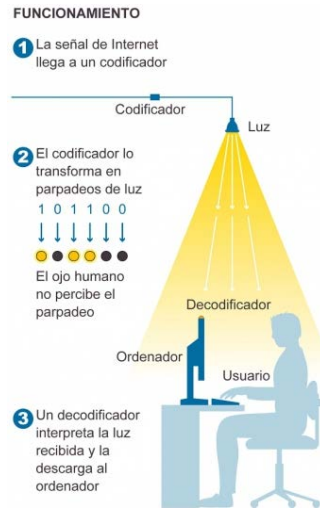


Figura 2 Transmisión-recepción de datos mediante VLC.

### Transmisor VLC

Un transmisor típico VLC basado en LED contiene un generador de señal (fuente de información, en este caso texto), un codificador (Raspberry Pi codifica sus puertos de salida como RZ), un modulador, seguido por el controlador y la óptica LED [Vinnarasi, 2017], figura 3. Los métodos de modulación disponibles para VLC, deben soportar atenuación y proporcionar mitigación de parpadeo. Las señales una vez moduladas se utilizan para conmutar los LEDs a las frecuencias deseadas usando controladores (Drivers) LED. Estos controladores se basan en amplificadores de transconductancia para convertir las señales de voltaje, en señales de corriente correspondientes para excitar las fuentes de luz (en este caso uno o más LEDs) para la transmisión de la información.

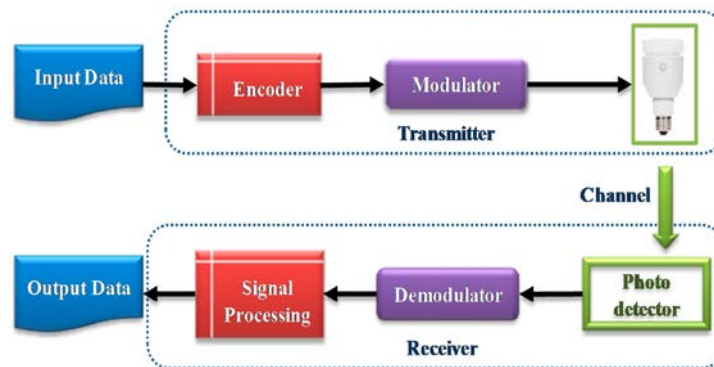


Figura 3 Transmisión de información VLC mediante luz de LED.

## Modulación VLC

Aunque existen diferentes esquemas de modulación para VLC, principalmente las modulaciones de:

- Encendido/apagado (OOK: On-Off-Keying).
- Posición de pulsos variable (VPPM: Variable Pulse Position Modulation).
- Codificación por desplazamiento de color (CSK: Color Shift Keying).
- Multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing), [10] son las más populares. De todas ellas, OOK es el esquema de modulación más utilizado en VLC debido a su sencilla implementación. En este método, básicamente la intensidad del LED se cambia entre dos niveles distinguibles correspondientes a los bits de datos (1 ó 0), figura 4a. Un OOK modificado llamado Variable OOK (VOOK) puede proporcionar atenuación. Esto se consigue cambiando el ciclo de trabajo de datos a través de la modulación de ancho de pulso (PWM: Pulse Width Modulation), con sólo 1 bit de información transportada por período de símbolo (figura 4b).

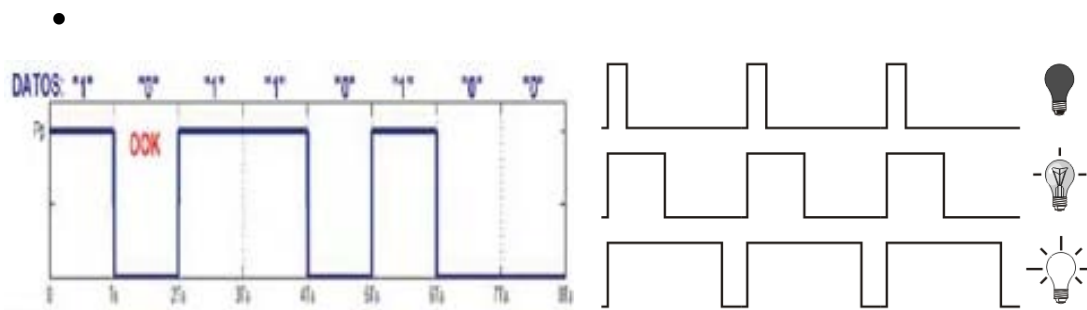


Figura 4 Codificación OOK y Codificación OOK con PWM.

## Receptor VLC

Un receptor VLC simple consiste en un foto-detector seguido de un amplificador, figura 5. La fotocelda o fotorresistencia LDR (Light Detect Resistor) de la figura 5, es una resistencia cuyo valor en ohmios ( $\Omega$ ) varía ante los cambios de la luz incidente. La fotocelda presenta un valor bajo de resistencia ante la presencia de luz y un alto valor ante la ausencia de luz.



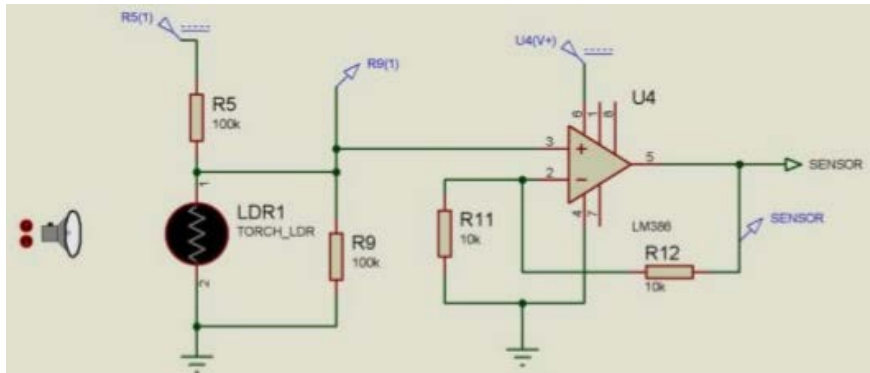


Figura 5 Una LDR como foto-detector seguido de un amplificador.

## Desarrollo

A continuación, desarrollamos una aplicación VLC para transmitir una frase de texto usando dos LED en el transmisor y un foto-detector en el receptor. Mediremos también la velocidad de este enlace. Para ello usaremos en el transmisor como fuente de datos, una computadora Raspberry Pi 3 (RBPi3), figura 6, y cinco módulos (“bits”) de LittleBits [LittleBits, 2018]: energía, botón, proto, divisor y dos LED brillantes, figura 7.

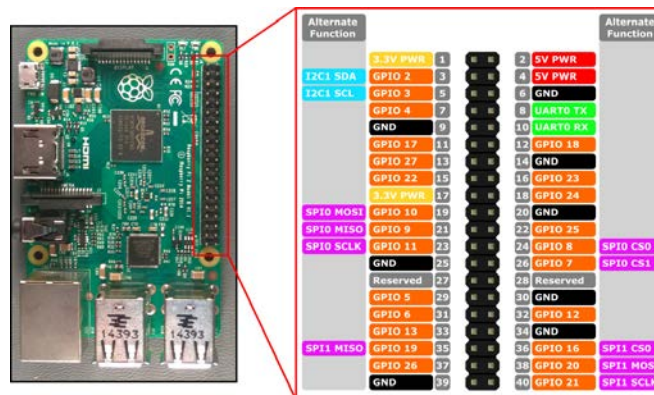


Figura 6 Raspberry Pi 3 y diagrama de pines: SPI MOSI y MISO.

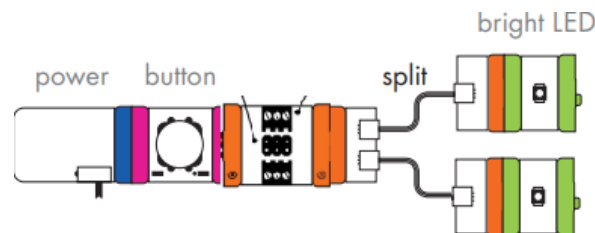


Figura 7 Transmisión VLC con LittleBits: Energía, botón, proto, divisor y LEDs.

El RBPi3 ejecutará un programa escrito en Python que leerá texto ascii byte por byte, y enviará cada byte a través del puerto 19 de salida SPI-MOSI (Serial Peripheral Interface, Master Output-Slave Input), hacia el módulo proto, señales OOK para excitar a dos LEDs. Mientras que, en el receptor, se emplean tres componentes LittleBits: energía, sensor de luz y otro bit proto, figura 8.



Figura 8 Recepción VLC con módulos LittleBits: Sensor de luz y proto.

El sensor de luz captura la luz emitida por los dos LED y la reconvierte en una señal digital OOK, que alimenta al módulo proto. Este módulo a su vez regresa esta señal a través de dos conectores (señal y tierra), al puerto de entrada 21 SPI-MISO (Master Input-Slave Output), del RBPi.

### 3. Resultados

Para transmitir texto a través de VLC, el RBPi3 con un script escrito en Python, se declara y nombra un arreglo de bytes "tx\_data" y se escribe el texto "Hola Li-Fi", con la directiva "ord", que convierte cada carácter ascii en dos números hexadecimales, figura 9. Luego, con un bucle "while", se lee cada byte de "tx\_data" y se envía al puerto de salida SPI-MOSI 19, utilizando la directiva spi.xfer(). Esta salida MOSI se alimenta utilizando dos conectores de cable (señal y tierra), en la entrada del módulo "proto" (conector central inferior en la figura 8). El módulo proto recibe y divide las señales OOK para controlar los dos LED. El breve código en Python para ejecutar lo anterior se muestra en la figura 9.

En este código, es necesario importar las siguientes bibliotecas: "SPI", y "Array". El uso de los módulos LittleBits simplificó mucho la implementación del hardware. El módulo de energía se alimentó con una batería de 9 V, y esto fue necesario porque las salidas del RBPi3 son de bajo voltaje (3.3 voltios) y baja corriente (los

pinos individuales no deben proporcionar más de 16 mA y el GPIO completo no más de 50 mA), que no es lo suficiente para excitar a dos LED brillantes [Raspberry Pi, 2018]. Estos LED son LEDs amarillos simples con una longitud de onda de 550 a 600 nm, flujo luminoso de 4 a 5 lm, y consumen alrededor de 16 a 20 mA cada uno, con un ángulo de apertura de aproximadamente 120 grados, figura 10.

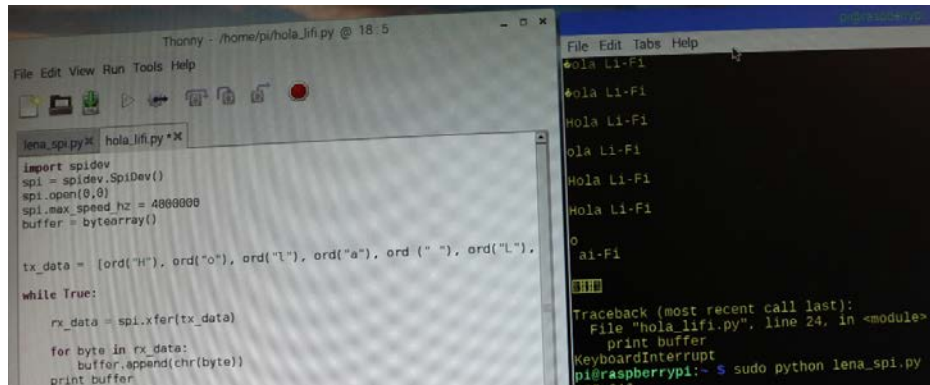


Figura 9 Código en Python (izquierda) y resultados (derecha) para enviar texto vía VLC.



Figura 10 LED amarillo brillante y módulo de alimentación.

Como se mencionó, el texto “Hola Li-Fi” se envió a través de VLC como luz LED. Esta luz se recibe a través de un módulo sensor de luz que luego lo envía de vuelta a través de otro módulo proto, al puerto MISO 21 del RBPi. Este sensor de luz no solo recibe la señal de luz OOK sino que también tiene un amplificador de transimpedancia para una operación de alta velocidad. El sensor de luz tiene 2 modos, figura 8. En modo LIGHT, a medida que la luz que brilla sobre el sensor se hace más brillante, pasa más señal a través de él. En modo OSCURO, la señal aumenta a medida que se oscurece. Además, el sensor de luz tiene un dial de sensibilidad o regulador deslizante para ajustar cuánta luz se necesite para

cambiar la señal, y tiene un rango de sensibilidad espectral de 500 a 600 nm, similar a la longitud de onda de los LED, figura 11.

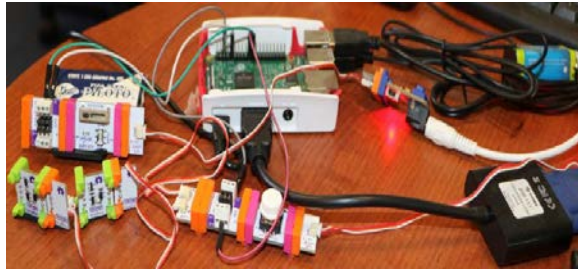


Figura 11 Circuito receptor de texto vía VLC.

El texto recuperado de la entrada de SPI MISO se almacena en un búfer, se guarda y se muestra, como se puede ver en las últimas líneas de código en Python de la figura 9.

### **Métrica del enlace transmisor-receptor**

En virtud de que la transmisión (LEDs) y recepción (Sensor de luz) del enlace se realiza empleando SPI de Raspberry, surgen dos interrogantes:

- **¿Cuál es la velocidad de este enlace?** Velocidad del enlace transmisor-receptor: Raspberry Pi implementa el modo estándar de SPI (como se mencionó en la sección 2.4), a través de las señales MOSI (pin 19), MISO (pin 21) y SCLK (la señal de reloj). Con MOSI se envían comandos y datos (a los LEDs) durante la transmisión, y con MISO se reciben datos (del Sensor de luz), durante la recepción. En SPI los comandos y datos tienen una longitud de 8 bits, pero un bit extra se añade para indicar si el byte es un comando (como `spi.xfer(tx_data)`), o un dato (el parámetro `tx_data`). Todo ello sincronizado por la señal de reloj SCLK.

Por lo tanto el número de bits en la transmisión-recepción de la instrucción `rx_data = spi.xfer(tx_data)` (Octava línea de código de la figura 9), son  $3 \times 9 = 27$  bits (1 instrucción, 1 dato transmitido, y 1 dato recibido). Ahora bien, dado que la velocidad de reloj que se está utilizando es de 4 MHz (cuarta línea de la figura 9), y cada bit de instrucción o dato requiere un ciclo de

reloj, la velocidad del enlace transmisión-recepción resulta en: 4,000,000 ciclos/s/ (27 ciclos por bits de instrucción-datos) = 148.148 kbps.

- **¿Dónde yace la limitante de dicho enlace?** Limitantes del enlace transmisión recepción: En cuanto a qué limita el aumento de la velocidad en bits/s de este enlace, se tienen varios aspectos a considerar:
  - ✓ Velocidad de la interfaz MOSI-MISO de SPI: Sin utilizar los LEDs y el sensor de luz, es decir, conectando el pin 19 MOSI, directamente al pin 21 MISO del conector de Blackberry, se pudo constatar que la transmisión-recepción del texto “hola Li-Fi”, funcionó sin problemas con una señal de reloj SCLK desde 1 MHz-a 60-MHz. Sin embargo, cuando se conectaban dichos pines a los LEDs y al sensor de luz, solo operó de forma más o menos estable, a 4 MHz.
  - ✓ Número e intensidad de los LEDs: Se encontró que, a la velocidad de 4 MHz, la intensidad de una la luz de un LED disminuía, fue por ello que se decidió poner dos LEDs en paralelo. Poner tres o más LEDs en paralelo quizás hubiera mejorado, pero requiere enfocarlos para que su luz incida en el sensor de luz. Otra alternativa sería emplear un LED de mucho mayor intensidad, digamos de 1 Watt.
  - ✓ La sensibilidad del sensor de luz: Se encontró que el sensor de luz empleado de la empresa Littlebits, funciona muy bien para la transmisión-recepción, de señales analógicas como la música, sin embargo, para señales digitales, como es el caso de texto, su sensibilidad deja mucho que desear. Una alternativa es poner varios sensores de luz en paralelo, o bien, emplear otro tipo de sensores.
  - ✓ Distancia y alineación entre LEDs y sensor de luz: Debido a que la intensidad de la luz recibida por el sensor de luz, no era suficiente, la distancia y alineación entre ellos debió ser muy corta, del orden de 10 cm.
  - ✓ La luz ambiental: Se encontró que la luz fluorescente de las lámparas de iluminación ubicadas en el techo, afectan en cierto grado el funcionamiento de la transmisión-recepción de texto por medio de luz.

## **4. Discusión**

La figura 9 también muestra que el texto recuperado no era perfecto. Eso se debió como se mencionó, a la presencia de ruido, principalmente: luz fluorescente de las lámparas del techo, desalineación y distancia entre los LED y el sensor de luz, y baja sensibilidad a la luz del sensor.

Después de varios ajustes en la configuración y algunos intentos, el texto finalmente se recuperó aceptablemente bien. Naturalmente, el ruido no puede eliminarse completamente y aumenta cuando la desalineación y la distancia entre los LED y el sensor de luz es mayor. Además, el brillo de los LED influye en el rendimiento. Esa fue la razón principal para usar dos LED en paralelo para aumentar la cantidad de luz enviada al sensor de luz.

Un aspecto que también es importante mencionar, es el por qué utilizar una computadora Raspberry en lugar de un microcontrolador tipo Arduino UNO. La razón principal es la velocidad. La velocidad de la Raspberry Pi 3, puede alcanzar la frecuencia de hasta 250 MHz [Raspberry Pi, 2018], mientras que el de Arduino UNO es apenas de 16 MHz. Por otra parte, el lenguaje de programación Python, es bastante robusto y viene incluido en el sistema operativo Raspbian de Raspberry.

Este trabajo difiere con respecto a trabajos similares a los de [Sandip, 2017], [Vinnarasi, 2017] y [Smita, 2017], en lo siguiente. En [Sandip, 2017] se emplean dos PCs, y dos microcontroladores UNO. Además, el software Matlab debe residir en ambas PC para conectarse con los microcontroladores y para procesar la descarga y descarga del texto. En [Vinnarasi, 2017] también se requiere el uso de dos microcontroladores (uno para la transmisión y el otro para la recepción), pero la transmisión de texto se realiza empleando luz infrarroja. En [Smita, 2017] además de los dos microcontroladores UNO, la transmisión-recepción de texto es en forma de chat.

## **5. Conclusiones**

Se desarrolló una aplicación de transmisión y recepción de texto via VLC utilizando una computadora Raspberry Pi 3, dos LED brillantes y un sensor de luz

de LittleBits, así como la modulación OOK y la biblioteca SPI de Python. El texto, se recuperó aceptablemente bien, aunque con una pequeña presencia de ruido. Cabe señalar que este ruido se debe a la luz ambiental y a la distancia entre los LED y el sensor de luz.

Este trabajo estuvo apoyado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional. Proyecto SIP 20181758.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Aleksandar Jovicic, Junyi Li and Tom Richardson. 2013. "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market". DOI: 10.1109/MCOM.2013.6685754: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6685754/>
- [2] Haas, H. 2013. High-speed wireless networking using visible light. SPIE Newsroom. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/2.1201304.004773>.
- [3] Kwonhyung Lee; Hyuncheol Park. 2011. Modulations for Visible Light Communications With Dimming Control. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 23, Issue 16, August. DOI: 10.1109/LPT.2011.2157676: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5773477/>.
- [4] LittleBits. 2018. <https://littlebits.cc/>.
- [5] Raspberry Pi. 2018. Raspberry Pi input and output pin voltaje and current capability. Mosaic Documentation Web. <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/raspberry-pi/gpio-pin-electrical-specifications>.
- [6] Raspberry Pi Documentation. 2018. Raspberry Pi SPI Readme, <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/spi/README.md>.
- [7] Sandip Das, Ankan Chakraborty, and Debjani Chakraborty. 2017. PC to PC data transmission using visible light communication. 2017 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). DOI: 10.1109/ICCCI.2017.8117767. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8117767/>.
- [8] Sherman, J. 2013. How LED Light Bulbs could replace Wi-Fi. Digital Trends. <http://www.digitaltrends.com/mobile/light-bulb-li-fi-wireless-internet/>.

- [9] Smita Pawar et al, 2017, LiFi Technology: Visible Light Communication and its Applications. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 8, Issue 2, Pp 51-54. <https://www.ijser.org/researchpaper/lifi-technology-visible-light-communication-and-its-applications.pdf>.
- [10] TED Ideas worth spreading. 2011. Harald Haas: Wireless data from every light bulb. [http://www.ted.com/talks/harald\\_haas\\_wireless\\_data\\_from\\_every\\_light\\_bulb](http://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb).
- [11] Tsonev, D., Videv, S. and Haas, H. December 18, 2013. Light fidelity (Li-Fi): towards all-optical networking. *Proc. SPIE (Broadband Access Communication Technologies VIII)* 9007 (2). DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2044649>.
- [12] Vincent, J. 2013. Li-Fi revolution: internet connections using light bulbs are 250 times faster than broadband. <http://www.independent.co.uk/news/science/li-fi-revolution-internet-connections-using-light-bulbs-are-250-times-faster-than-broadband-8909320.html>.
- [13] Vinnarasi, Liwei Ding, and S. T. Aarthy. 2017. Transmission of Data, Audio Signal and Text Using Li-Fi. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 117, No. 17, Pp 179-186. <https://acadpubl.eu/jsi/2017-117-16/articles/17/24.pdf>.
- [14] Wikipedia. 2017. Visible Light Communication. [https://en.wikipedia.org/wiki/Visible\\_light\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Visible_light_communication).



# **SISTEMA PARA EL ACCESO A SERVICIOS EN ÁREAS UBICUAS ORIENTADO A PERSONAS CON DISCAPACIDAD MOTRIZ**

*SYSTEM FOR ACCESS TO SERVICES IN AREAS UBIQUITOUS  
ORIENTED PEOPLE WITH DISABILITIES MOTRIZ*

**José Luis Santiago López**

Universidad de la Sierra Sur  
*jlsantiagolopez@hotmail.com*

**Alejandro Jarillo Silva**

Universidad de la Sierra Sur  
*ajarillo@unsis.edu.mx*

**Víctor Alberto Gómez Pérez**

Universidad de la Sierra Sur  
*vgomez@unsis.edu.mx*

**Irving Ulises Hernández Miguel**

Universidad de la Sierra Sur  
*irving.u.h.m@gmail.com*

## **Resumen**

En este artículo se presenta el diseño y desarrollo de un sistema basado en la integración de diferentes tecnologías relacionadas con el paradigma del cómputo ubicuo. La aplicación de este paradigma permite a personas con discapacidad motriz mejorar su calidad de vida, a partir de la manipulación de servicios disponibles en diferentes áreas ubicuas. El objetivo del desarrollo del sistema es que sea usable y factible, para el caso de la usabilidad se hace uso de la metodología Diseño Centrado en el Usuario y para la factibilidad se emplea tecnología a bajo costo. La arquitectura del sistema se basa en SEDINU (SErvice Discovery for Nomadic Users). Para las pruebas de usabilidad heurísticas y test de usuario se montó un área ubicua con tres servicios disponibles (dos lámparas y un ventilador), donde los evaluadores probaron el funcionamiento del sistema. En conclusión, en base a los resultados el sistema es usable.

**Palabras Claves:** Cómputo ubicuo, dispositivo móvil, ingeniería de software, usabilidad.

## **Abstract**

*This article presents the design and development of a system based on the integration of different technologies related to the paradigm of ubiquitous computing. The application of this paradigm allows people with motor disabilities to improve their quality of life, from the manipulation of services available in different ubiquitous areas. The objective of the development of the system is that it is usable and feasible, for the case of usability the use of the User Centered Design methodology is used and for the feasibility technology is used at low cost. The architecture of the system is based on SEDINU (Service Discovery for Nomadic Users). For the heuristic usability tests and the user test, a ubiquitous area with three available services (two lamps and a fan) was set up, where the evaluators tested the system's operation. In conclusion based on the results the system is usable.*

**Keywords:** *Mobile device, software engineering, usability, ubiquitous computing.*

## **1. Introducción**

Las actividades que se realizan en la vida cotidiana, por insignificantes que parezcan, pueden dejar a una persona marcada de por vida, dado el hecho de que existen episodios en los cuales una persona, al ejecutar una acción, puede llegar a perder la estabilidad del cuerpo y, en consecuencia, sufrir un accidente. Por ejemplo, una mala maniobra al conducir un auto, pisar mal un escalón o tropezar con algún obstáculo. Otro factor que origina problemas de discapacidad motriz es la edad. De acuerdo con Smith [2014], el 40% de los mayores de 65 años son limitados en la actividad física, mientras que 2 de cada 5 personas mayores indican que tienen un trastorno físico que les impide practicar plenamente en muchas actividades cotidianas comunes.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI, 2013], los problemas de movilidad tanto en los miembros superiores como inferiores, se encuentran en la cima con un 58.3% en comparación con otras discapacidades. Por ejemplo, discapacidad visual (27.2 %), auditiva (12.1 %) y la mental (8.5%). Cabe mencionar que la pérdida de movilidad en los miembros antes mencionados

está inmersa en la categoría de la discapacidad motriz, condición de vida que afecta el control y movimiento del cuerpo, generando alteraciones en el desplazamiento, equilibrio, manipulación, habla y respiración de quienes la padecen [DGEE, 2013].

Hoy en día un ambiente inteligente es considerado un nuevo paradigma en tecnología de la información destinado a potenciar las capacidades de las personas a través de entornos digitales que son sensibles, adaptables y receptivos a las necesidades, los hábitos, los gestos y las emociones del ser humano [Acampora, 2013]. Por otra parte, la Tecnología Asistiva (TA) se refiere a un concepto innovador que integra la tecnología dentro de residencias para mantener la seguridad y la calidad de vida de los residentes. Las TAs indican una amplia gama de dispositivos, servicios, estrategias y prácticas que se conciben y se aplican para mejorar los problemas al que se enfrentan las personas que tienen discapacidades principalmente motrices [Yusif, 2016].

En el primer Encuentro Nacional de Innovación Tecnológica para la Discapacidad realizado en la ciudad de Morelia, Michoacán en diciembre del 2017 se presentaron distintos prototipos dirigidos a la problemática de asistir a personas con discapacidad. Entre ellos, Ratón para Computadora Controlado por Joystick: Accesibilidad para Personas con Discapacidad Motora, Aplicación Móvil Para Apoyar a Personas con Problemas Auditivos y Dificultades para Comunicarse Verbalmente y Bastón inteligente. En dichos proyectos se presentan diferentes soluciones a partir de la integración de diferentes tecnologías, no obstante, una parte importante es la privacidad y seguridad de las personas que emplean el sistema. Una posible solución para la seguridad es el reconocimiento de voz, que permite controlar una serie de elementos disponibles en un entorno cerrado: por ejemplo, la luz, el ventilador, las puertas, las ventanas, entre otros [Montalvo, 2009].

Dentro de la problemática de asistir a personas con discapacidad se presenta el escaso acceso a la tecnología y la facilidad de uso diario de la misma, además, del temor a la dependencia y la falta de entrenamiento. Para el caso de la dependencia y falta de entrenamiento se pueden emplear señales biométricas para el control de

servicios. Un ejemplo de ello es el desarrollo de un sistema BCI (Brain Computer Interface) el cual emplea la señal de un EEG (Electroencefalograma) para el control domótico, dicho sistema presenta una precisión de interpretación por encima del 65% [Hornero, 2013]. Para el problema del acceso a la tecnología, la computación ubicua es una alternativa para la automatización de viviendas, además de la inclusión de teléfonos celulares inteligentes con pantalla táctil para el control de servicios [Shruthi, 2014].

Se presenta el diseño, desarrollo y evaluación de un sistema computacional ubicuo capaz de asistir a personas con discapacidad visual a ubicar entradas. Dicho sistema emplea la instalación de Beacon Groups instalados en las entradas, y a través de un móvil se les informa de las cercanías con las entradas [Grimblatt, 2015]. Por otro lado, el proyecto de investigación titulado “Diseño de un dispositivo domótico para control de iluminación” emplea el control remoto a través de una red usando el protocolo Zigbee, de tal manera que es posible tener el control de iluminación, ya sea en un hogar o en una oficina [Alvarino, 2015].

El presente trabajo describe la integración de un sistema ubicuo que sea usable y factible para aquellas personas que sufren de una discapacidad motriz principalmente, y que ofrece una alternativa en el control, acceso y administración de múltiples servicios en el hogar (encendido y apagado de un foco, un ventilador, un televisor, una ventana, una puerta, etc.). Además, incluye distintos paradigmas de interacción que van desde el lenguaje natural hasta el uso de interfaces en un dispositivo móvil.

## **2. Métodos**

Las etapas de desarrollo (figura 1) tomadas en cuenta para el desarrollo de esta investigación se basan en el estándar ISO 13407 (ISO 13407 Standard, Human-Centred Design Processes for Interactive Systems) [ISO, 1999], el cual provee una guía sobre las actividades de Diseño Centrado en el Usuario (DCU), a través del ciclo de vida de sistemas interactivos para conseguir sistemas fáciles de utilizar y de aprender [Bevan, 2009]. En las siguientes subsecciones se presenta una descripción de cada etapa.

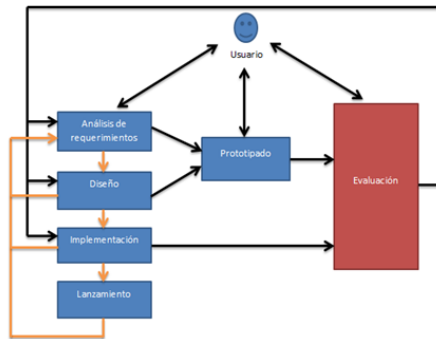


Figura 1 Diseño centrado en el usuario DCU: etapas.

### **Análisis de requerimientos**

Se elabora un análisis de usuarios con la finalidad de recabar la mayor cantidad de información posible, para desarrollar un sistema capaz de contribuir a mejorar la calidad de vida de los usuarios. Las variables de estudio consideradas para modelar a los usuarios se generan a partir de un análisis etnográfico, mismo que se discute a continuación.

A partir de una muestra estratificada de 30 sujetos posibles para usar el sistema, se obtienen los siguientes resultados: los usuarios se encuentran en el rango de edad entre 30 y 75 años, 75% de los usuarios entrevistados presentan problemas de movilidad en los miembros inferiores (cintura, piernas), 100% de usuarios entrevistados hablan español y no presentan problemas del habla. Sin embargo, el 75% de los usuarios cuentan con educación secundaria y el 25% restante sólo tienen educación primaria. El 95% de los usuarios gozan de un dispositivo móvil, lo utilizan frecuentemente y no temen al uso de la tecnología. Cabe mencionar que el 90% de los usuarios entrevistados pasan mayor tiempo en el trabajo.

### **Análisis de tareas**

El análisis de tareas tiene como propósito comprender y definir las funciones de un sistema, basadas en los distintos procesos que un usuario ejecuta para completar una tarea que comúnmente realiza en su vida diaria y, a su vez, mapearla a un proceso automatizado. Para ello se implementaron técnicas de escenarios, diagramas UML, HTA, prototipos de baja y alta fidelidad (en la figura 2 se observa un ejemplo de un caso de uso).



Figura 2 Diagrama de casos de uso: usuario nómada (aplicación móvil).

## Diseño de interfaces de usuario

La participación del usuario durante la etapa de diseño es un elemento clave para el éxito de cualquier sistema.

A partir de un diseño participativo (cuatro usuarios nómadas y dos usuarios administradores) se obtienen las interfaces finales del sistema tanto para el usuario como para el administrador.

En la figura 3 se presenta la interfaz para dar de alta, baja, modificación y consulta de un usuario. En la figura 4 se presentan las interfaces de usuario para el acceso y control de servicios.



Figura 3 Interfaz de usuario para el registro de un nuevo usuario.

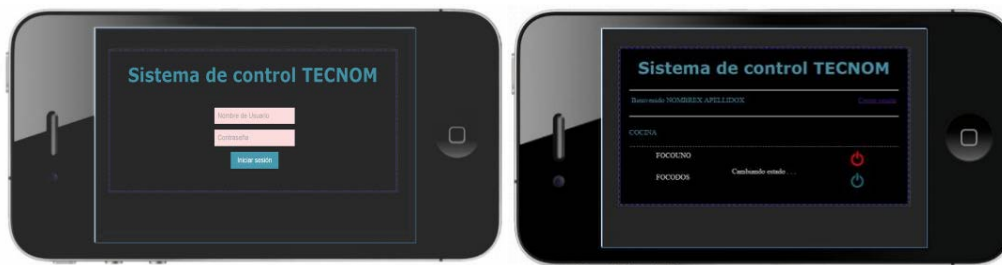


Figura 4 Interfaz de usuario para aplicación móvil.

En la figura 5 se muestra la interfaz de usuario para el administrador donde puede dar de alta, baja, modificaciones y consulta de usuarios, servicios y áreas ubicuas.

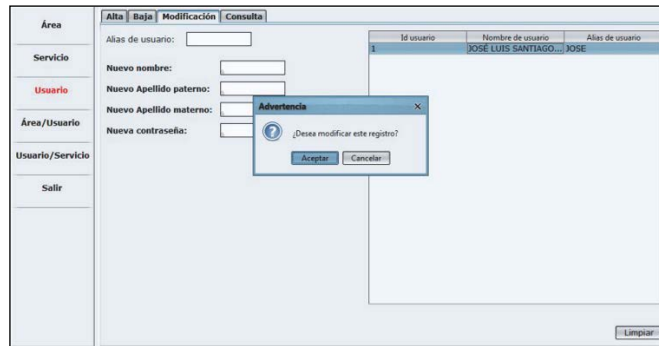


Figura 5 Interfaz de usuario para el administrador de servicios.

### Diseño del sistema

La arquitectura de sistemas es la representación gráfica de módulos o componentes de un sistema y las relaciones entre los mismos [Sommerville, 2005]. Acorde a esta definición se presenta la arquitectura modular (figura 6) basada en el sistema SEDINU [Gómez, 2015], que muestra los distintos módulos lógicos con los que cuenta el sistema ubicuo, así mismo como las relaciones que existen entre éstos. La parte importante entre dichos módulos es el flujo de información que se transmite a través de sus enlaces, mejor conocidos como mecanismos de comunicación.

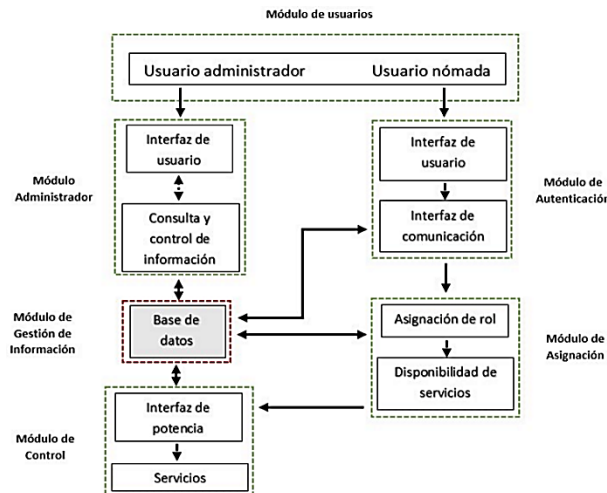


Figura 6 Arquitectura modular del sistema propuesto.

### **Módulo de usuarios y administrador**

Se definen dos tipos de usuarios: **usuario administrador** (cada vivienda contará con un sólo usuario administrador) y **el usuario nómada** (puede ser uno o varios usuarios nómadas), los cuales realizan diferentes tareas al momento de interactuar con el sistema, ejemplos:

- El usuario administrador utiliza las interfaces de usuario encontradas en el módulo administrador, para añadir, borrar, modificar o consultar información (usuarios, servicios y áreas) en la base de datos.
- El usuario nómada se autentifica mediante interfaces de usuario, para después asignarle un rol, el cual le permite la disponibilidad de servicios dentro de un área determinada. Por otra parte, el módulo administrador se encarga de la asignación de permisos al usuario administrador para añadir, borrar, modificar y consultar registros de áreas, servicios y usuarios, a través de una interfaz de usuario.

### **Módulo de autenticación**

Existen dos formas para que un usuario nómada pueda ser identificado por el sistema: mediante el reconocimiento facial o por medio de una aplicación para móvil (figura 7).



Figura 7 Reconocimiento facial y aplicación móvil.

**Reconocimiento facial:** Este módulo se encarga de capturar, analizar y comparar la imagen del sujeto obtenida a través de una cámara, con información de usuarios registrados en la base de datos. De esta manera, es posible asignarle acceso a la



manipulación de servicios dentro de un área, siempre y cuando tenga asignado un rol dentro del sistema. A continuación, se presenta una serie de pasos ordenados que el usuario nómada debe realizar para una interacción correcta con el sistema:

- Colocar su rostro enfrente de la cámara hasta que el sistema logre identificarlo y le dé la bienvenida mediante comandos de voz (aproximadamente 20 segundos en el peor de los casos y en el mejor de los casos menores de 4 segundos).
- El sistema ubicuo da a conocer al usuario nómada los servicios disponibles dentro del área de manera auditiva de acuerdo con el rol asignado a éste. Por lo tanto, cada área debe contar con un sistema de audio (bocinas y micrófono).
- El usuario nómada puede manipular los servicios por medio de comandos de voz, o mediante el uso de una diadema inalámbrica (en este caso para efectos de demostración se presenta el servicio de iluminación de dos focos y el servicio de ventilación).
- El usuario, al salir de la habitación o área, puede acceder a otra área de la vivienda y le será asignado un nuevo rol a través del reconocimiento facial. Automáticamente se finalizará la sesión del área donde se encontraba anteriormente.
- El usuario puede finalizar sesión dentro del área mediante comandos de voz.

Para la aplicación del reconocimiento facial se emplea la biblioteca OpenCV y el lenguaje de programación java.

**Aplicación móvil:** Una forma sencilla de mostrar y controlar los servicios en una determinada área ubicua es por medio de interfaces para dispositivos móviles, proporcionadas por el módulo de autenticación. Dichas interfaces atienden las siguientes funciones:

- Autenticación de un usuario (ingresa datos de usuario y contraseña en la interfaz móvil).
- Control de servicios por medio de una interfaz móvil donde el control de cada servicio es representando por botones.

- Cierre de sesión. En todo caso que el usuario abandone el área sin cerrar sesión desde la aplicación móvil o mediante comandos de voz, pueden suceder las siguientes situaciones:
  - ✓ El usuario nómada puede ser reconocido por una cámara de otra área y su sesión en el área anterior se finalizaría, de tal forma que se le otorgarían los nuevos servicios del área actual donde se encuentra.
  - ✓ El usuario nómada puede circular por la vivienda sin necesidad de entrar a un área y su sesión sigue activa en el área que abandonó, puesto que la localización del usuario y apertura de sesión se lleva a cabo mediante las cámaras instaladas en cada una de las áreas de la vivienda, por lo tanto, debe ser identificado en otra área, para que se finalice automáticamente su sesión en la anterior.

### Módulo de Asignación

Al momento en que un usuario nómada ingrese a un área de la vivienda e inicie sesión, le es asignado un rol con información obtenida desde la base de datos acerca de los servicios encontrados en cierta área. Del mismo modo, pueden existir dos o más usuarios nómadas dentro de la misma. La diferencia radica en los privilegios que cada usuario tiene sobre un servicio. Ejemplo: la figura 8 muestra el Área 1 que cuenta con el Servicio 1 y Servicio 2, asignados tanto al Usuario 1 como al Usuario 2, donde:

- El Usuario 1 tiene el mismo privilegio que el Usuario 2 sobre el Servicio 1, por lo tanto, los dos pueden hacer uso sin restricciones de dicho servicio.

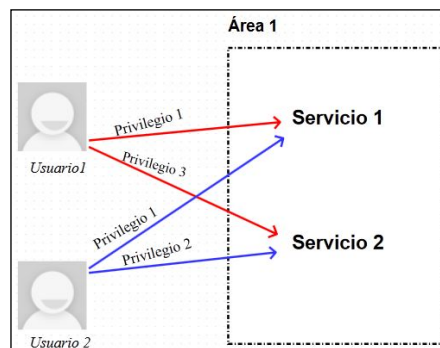


Figura 8 Privilegios de usuarios sobre servicios.

- Por otro lado, el Usuario 1 tiene mayor privilegio que el Usuario 2 sobre el Servicio 2, por lo tanto, el Usuario 2, no podrá tener acceso a cierto servicio.
- El Usuario 2 dentro del Área 1, no puede controlar el Servicio 2, puesto que el Usuario 1 está presente en la misma, y por ende tiene mayor privilegio que el Usuario 2 sobre el Servicio 2. En dado caso que el Usuario 1 finalice su sesión, el Usuario 2, podrá utilizar el Servicio 2, puesto que no hay otro usuario con mayores privilegios que el mismo dentro del Área 1.

### **Módulo de Control**

El módulo de control está compuesto por una interfaz de potencia, la cual es un dispositivo electrónico capaz de cambiar el estado (encendido/apagado) de un servicio. La interfaz de potencia interpreta la entrada de información de las interfaces de comunicación utilizadas por los usuarios nómadas, así mismo, estas interfaces están comunicadas directamente con la base de datos.

### **Módulo de Gestión de Información**

Una parte importante para un sistema dinámico, respecto a la entrada y salida de información, es la base de datos o el medio donde se concentra toda la información, por lo que este módulo es el encargado de gestionar toda la información acerca de áreas, usuarios y servicios, así como las relaciones entre los mismos.

## **3. Resultados**

Para la evaluación del sistema se realizó pruebas heurísticas y Test de usuario. Para la heurística se contemplaron cuatro usuarios expertos, denotados como E1, E2, E3 y E4. Las tareas asignadas se muestran en las tablas 1 y 2.

Las pruebas heurísticas del sistema se aplicaron en la Universidad de la Sierra Sur. Al finalizar las tareas, los usuarios respondieron un cuestionario Post-Test. Las respuestas se definieron en una escala numérica del 1 al 5 (1 - nada, 2 - poco, 3 - regular, 4 - mucho, 5 - totalmente), dichos resultados se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 1 Tareas definidas para el administrador del sistema.

Tareas asignadas en la interfaz de administrados	
1. Iniciar sesión en la aplicación de escritorio (administrador).	2. Añadir dos nuevas áreas (cocina y dormitorio).
3. Añadir 4 servicios a las áreas nuevas (foco 1 y foco 2 a la cocina, foco 3 y 4 al dormitorio).	4. Añadir dos nuevos usuarios (usuario 1 y usuario 2).
5. Asignar a los dos usuarios nuevos las dos áreas ubicuas agregadas.	6. Asignar servicios a usuarios de la siguiente manera: Usuario 1 en la cocina accesos a foco 1 y 2 con privilegio 3 y en el dormitorio acceso a foco 3 y 4 con privilegio 2, al usuario 2 en la cocina accesos a foco 1 y 2 con privilegio 2 y en el dormitorio acceso a foco 3 y 4 con privilegio 3.
7. Eliminar el área de la cocina.	8. Modificar los datos del usuario 1.
9. Cerrar sesión.	

Tabla 2 Tareas definidas empleando interfaz de reconocimiento facial y aplicación móvil.

Tareas asignadas en la interfaz de reconocimiento facial y aplicación móvil	
1. Iniciar sesión en el área de la cocina a través del reconocimiento facial.	2. Preguntar los servicios disponibles mediante comandos.
3. Encender foco 1 mediante comandos de voz.	4. Encender foco 2 mediante comandos de voz.
5. Apagar foco 1 mediante comandos de voz.	6. Apagar foco 2 mediante comandos de voz.
7. Iniciar sesión en dormitorio a través de reconocimiento facial.	8. Iniciar sesión desde aplicación móvil y validar los servicios de foco 3 y 4 disponibles.
9. Encender el foco 3 desde la aplicación móvil.	10. Encender el foco 4 desde la aplicación móvil.
11. Apagar los focos 3 y 4 desde la aplicación móvil.	12. Finalizar sesión en dormitorio mediante comandos de voz.

Tabla 3 Cuestionario para usuarios expertos: Resultados finales Parte 1.

Aplicación para administrador				
Pregunta	E1	E2	E3	E4
1. ¿El sistema es fácil de usar?	5	5	4	5
2. ¿El sistema no comprende tareas complejas de realizar?	5	3	5	5
3. ¿El sistema cumple con las funciones necesarias para el manejo de información acerca de usuarios, áreas y servicios?	5	5	5	5
4. ¿El menú de opciones es legible y fácil de navegar?	5	5	5	5
5. ¿El sistema presenta la retroalimentación necesaria?	5	4	5	3
6. ¿El sistema mantiene la fuente y el tamaño de letra en todas las ventanas de navegación?	5	5	5	5
7. ¿El sistema no presenta ventanas u opciones innecesarias?	5	5	5	5
8. ¿El título del sistema es coherente respecto a su funcionamiento?	5	3	5	5
9. ¿Los colores del sistema no ofenden la visión?	5	5	5	4
10. ¿La aplicación informa de los errores que se han producido durante la ejecución de una tarea?	5	5	5	5
11. ¿La presentación de información es clara?	4	5	5	5
<b>Puntuación total</b>	<b>54</b>	<b>50</b>	<b>54</b>	<b>52</b>

Tabla 4 Cuestionario para usuarios expertos: Resultados finales parte 2.

<b>Aplicación para reconocimiento facial</b>				
<b>Pregunta</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
1. ¿La aplicación es fácil de usar?	5	3	5	5
2. ¿La aplicación provee las funciones necesarias para la manipulación de servicios?	5	5	5	5
3. ¿El reconocimiento de rostros es rápido?	5	3	4	3
4. ¿La retroalimentación por voz es clara y precisa?	4	4	5	4
5. ¿La aplicación comprende rápidamente las órdenes por comandos de voz?	5	4	4	3
6. ¿La aplicación informa de los errores que se han producido durante la ejecución de una tarea?	5	5	5	5
<b>Puntuación total</b>	<b>29</b>	<b>24</b>	<b>28</b>	<b>25</b>

Tabla 5 Cuestionario para usuarios expertos: Resultados finales Parte 3.

<b>Aplicación móvil</b>				
<b>Pregunta</b>	<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>E4</b>
1. ¿La aplicación móvil es fácil de utilizar?	5	5	5	5
2. ¿La aplicación móvil no comprende tareas complejas de realizar?	5	5	5	5
3. ¿La aplicación móvil provee las funciones necesarias para la manipulación de servicios?	5	5	5	5
4. ¿Las opciones presentadas en la aplicación son predecibles?	4	5	5	5
5. ¿La aplicación móvil presenta la retroalimentación necesaria?	5	5	5	5
6. ¿La aplicación móvil mantiene la fuente y el tamaño de letra en todas las ventanas de navegación?	5	5	5	5
7. ¿La aplicación móvil no presenta ventanas u opciones innecesarias?	5	5	5	5
8. ¿El título de la aplicación móvil es coherente respecto a su funcionamiento?	5	3	5	5
9. ¿Los colores de la aplicación móvil no ofenden la visión?	5	3	5	4
10.- ¿La aplicación móvil informa de los errores que han producido durante la ejecución una tarea?	5	4	5	5
11.- ¿La presentación de información es clara?	5	5	5	5
<b>Puntuación total</b>	<b>54</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>54</b>

Para la prueba de Test de usuario se llevó a cabo con los cuatro usuarios nómadas (U1, U2, U3 y U4) que han participado desde el inicio del desarrollo del proyecto y que hicieron posible la evaluación final del sistema en su hogar correspondiente. Los usuarios presentan al menos una discapacidad motriz en miembros superiores o inferiores. Después de cada prueba los usuarios respondían un cuestionario. En las tablas 6 y 7 se muestran los resultados de un cuestionario Post-Test, donde,

las posibles respuestas se definieron en una escala numérica del 1 al 5 (1 - nada, 2 - poco, 3 - regular, 4 - mucho, 5 - totalmente).

Tabla 6 Cuestionario usuario intermedio y usuario principal: Resultados finales Parte 1.

<b>Aplicación para reconocimiento facial</b>				
<b>Pregunta</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>
1. ¿La identificación de personas a través de una cámara, es importante para la seguridad del hogar?	5	5	5	5
2. ¿Le resulta fácil encender o apagar un foco por medio de comandos de voz?	5	3	5	5
3. ¿Se siente cómodo al utilizar este tipo de sistemas?	5	5	5	5
4. ¿El sistema es apto para personas que carecen de movimiento?	5	5	5	5
<b>Puntuación total</b>	<b>20</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>20</b>

Tabla 7 Cuestionario usuario intermedio y usuario principal: Resultados finales Parte 2.

<b>Aplicación móvil</b>				
<b>Pregunta</b>	<b>U1</b>	<b>U2</b>	<b>U3</b>	<b>U4</b>
1. ¿El diseño de la aplicación móvil le parece agradable?	5	5	5	5
2. ¿Se siente cómodo al controlar los servicios (foco, ventilador, entre otros) mediante un teléfono celular?	5	5	5	5
3. ¿Le resulta fácil encender o apagar un foco a través de un teléfono celular?	5	5	5	5
4. ¿La aplicación móvil es apta para personas que carecen de movimiento?	5	5	5	5
<b>Puntuación total</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>20</b>

## 4. Discusión

Acorde con los resultados obtenidos de los cuestionarios Post-Test, tanto para usuarios expertos como usuarios principales e intermedio, se tienen las siguientes premisas.

### Usuarios expertos

Resultados de evaluación respecto a la aplicación para administrador (tabla 3):

- Los usuarios expertos, al utilizar la aplicación, les resultó fácil, puesto que cuenta con un menú de opciones sencillo de navegar, y no comprende tareas complejas de realizar debido a que cumple con las funciones necesarias para ejecutar una tarea.

- Sin embargo, se hizo presente la carencia de mensajes para retroalimentar al usuario (e.g., “La opción Área - Alta, sirve para añadir nuevos registros de áreas”), lo cual produjo dudas en la interacción entre el usuario y la aplicación.
- Con base en el diseño, las interfaces mostraron una fuente y tamaño de letra constante en las diferentes ventanas de navegación.
- Del mismo modo, los colores de estas interfaces son idóneos para obtener una mejor visión de los resultados mostrados por la aplicación.

Resultados de evaluación respecto aplicación para reconocimiento facial (tabla 6):

- La aplicación para reconocimiento facial presentó dificultad y retardo al momento de identificar a un usuario.
- Esto se debe a la falta de un entorno controlado, lo cual quiere decir que la aplicación de reconocimiento facial es eficiente en áreas donde la iluminación es elevada y el color de paredes es claro.
- Cabe recalcar que la aplicación contempla e informa acerca de los errores que se producen durante la ejecución de una tarea.
- Igualmente cuenta con las funciones necesarias (sintetizador de voz) para la manipulación de servicios.

Resultados de evaluación respecto aplicación móvil (tabla 5):

- La aplicación móvil obtuvo excelentes resultados respecto a la facilidad de uso, la efectividad al ejecutar una tarea, la retroalimentación al usuario, navegación entre ventanas y el cumplimiento de las funciones necesarias para llevar a cabo una tarea.

### **Usuario intermedio y usuarios principales**

Resultados evaluación respecto aplicación para reconocimiento facial (tabla 4):

- Aun no teniendo un ambiente controlado, la aplicación para reconocimiento facial logró identificar a cada uno de los usuarios. Aunado a esto, los usuarios presentaron comodidad al interactuar con esta aplicación, calificando a la misma como un medio de seguridad en el hogar.

- Por otra parte, el control mediante comandos de voz presentó dificultad en uno de los usuarios debido a problemas de hardware (diadema de bajas prestaciones). A pesar de las dificultades con la diadema los usuarios prefieren controlar un servicio mediante comandos de voz, dado que no requiere de la interacción con algún dispositivo móvil, y es apta para usuarios que presente discapacidad en miembros superiores e inferiores.

Resultados evaluación respecto aplicación móvil (tabla 7):

- Los usuarios principales e intermedios calificaron como excelente a la aplicación móvil debido a que es una aplicación, fácil de utilizar, cómoda y apta para personas que padecen de una discapacidad temporal o permanente en miembros inferiores.

## **5. Conclusiones**

Para proporcionar una herramienta útil a los usuarios que padecen discapacidad motriz o personas de la tercera edad se profundizó en una investigación acerca de los avances respecto a la tecnología en hogares inteligentes. A partir de esta investigación se generó el diseño de una arquitectura modular para el sistema propuesto basada en una arquitectura llamada SEDINU, la cual ha sido el punto de partida para el desarrollo de nuestro sistema.

Aunado a los resultados de la evaluación discutidos en la sección anterior, se llega a la conclusión de que el sistema mejora la calidad de vida de las personas dado que se puede manipular un servicio, ya sea por comandos de voz o por medio de un dispositivo móvil, sin la necesidad de trasladarse de un lugar a otro. Sin embargo, la actividad del sistema puede ser afectada por diferentes factores. Por ejemplo: falta de luz eléctrica para alimentar al sistema, fallos con las cámaras para la identificación de rostros o pérdida de conexión con la red.

A partir de esto último se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Para fortalecer los resultados de este trabajo es necesario realizar medidas de rendimiento que permitan evaluar la accesibilidad del sistema. También se requiere de un análisis más exhaustivo del nivel de interacción.



- Migrar del código de cada módulo del sistema al código para web con el propósito de manipular herramientas para entornos ubicuos desde la Internet y controlar los servicios a larga distancia, independientemente de la plataforma que se esté utilizando (multiplataforma).
- Desarrollar o recabar algoritmos para reconocimiento de voz y aplicar métodos de filtrado para obtener menor ruido posible.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Acampora G, Cook J., Rashidi P & Vasilakos V (2013). A Survey on Ambient Intelligence in Health Care, Proc IEEE Inst Electr Electron Eng. Dec 1; 101(12): 2470–2494.
- [2] Alavarino, E., Marchena P., Castellar J., Jimenéz H. & Quintero A (2015). Diseño de un dispositivo domótico para el control de iluminación. Investigación y Desarrollo en TIC, vol. 6, no. 1, pp. 26-33.
- [3] Bevan, N. (2009). Usability net methods for user centered design. Human-Computer Interaction: theory and practice, 1(1), 1-6.
- [4] DGEE. (2013). Discapacidad motriz: <http://eespecial.sev.gob.mx/difusion/motriz.php>.
- [5] Gómez, V., Mendoza, S., García, K., Decouchant, D. (2015) Facilitating nomadic interaction through a self-managed area-based support. ECORFAN Journal-Spain 2015,2-3:161-179.
- [6] Graschew, G., Rakowsky, S., Roelofs, T., & Schlag, P. (2010). Design and Implementation of Satellite-Based Networks and Services for Ubiquitous Access to Healthcare, Satellite Communications. En N. Diodato (Ed.), (cap. 6). Alemania: Sciyo.
- [7] Grimblatt, V. (2015). Sistema de computación ubicua para relacionar a personas con discapacidad visual con su entorno (Memoria): Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas.
- [8] Hornero R, Corralejo R., Álvarez D., Martín M. Diseño, desarrollo y evaluación de un sistema Brain Computer Interface (BCI) aplicado al control de dispositivos domóticos para mejorar la calidad de vida de las personas con

- grave discapacidad, Trauma Fund MAPFRE (2013), Vol 24, nº 2:117-125, España.
- [9] INEGI. (2013). Las personas con discapacidad en México una visión al 2010: [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/discapacidad/702825051785.pdf](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/poblacion/2010/discapacidad/702825051785.pdf).
- [10] Lledó, S. E. (2012). Diseño de un sistema de control domótico basado en la plataforma Arduino (Tesis de licenciatura). Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [11] Montalvo, L. C. H. (2009). Edificios inteligentes para personas con discapacidad (Tesis de licenciatura). Universidad Técnica del Norte, Ecuador.
- [12] Navarrete, C. M. (2010). Administración de flujos de trabajo organizados en áreas autónomas para entornos ubicuos (Tesis de maestría). CINVESTAV-IPN, México, DF.
- [13] Pérez, P. J. C. (2011). Mecanismo ubicuo de localización de dispositivos móviles (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, México, D.F.
- [14] Shruthi J. & Bharathy (2014). Home Appliance control for users with motor disabilities using smart phone. International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), Volumen 1, Issue 6.
- [15] Sommerville, I., & Alfonso, G. M. I. (2005). Ingeniería de software. Madrid: Addison-Wesley.
- [16] Smith, A. (2014) Older Adults and Technology Use. PewResearchCenter: <http://www.pewresearch.org/>.
- [17] Yusif S., Soar J & Hafeez-Baig A. (2016), Older people, assistive technologies, and the barriers to adoption: A systematic review, International Journal of Medical Informatics.

# **ANALIZADOR DE ESPECTRO CON FUNCIÓN DE MONITOREO REMOTO MEDIANTE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE**

## *SPECTRUM ANALYZER WITH REMOTE MONITORING FUNCTION BY SOFTWARE DEFINED RADIO*

***Ismael Santiago Rivera***

Instituto Politécnico Nacional  
*ismael.sr04@hotmail.com*

***Sergio Vidal Beltrán***

Instituto Politécnico Nacional  
*svidalb@ipn.mx*

***Fernando Martínez Piñón***

Instituto Politécnico Nacional  
*fmartinezp@ipn.mx*

### **Resumen**

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un analizador de espectro, que además funcione de manera remota para monitorear señales electromagnéticas de radiofrecuencia mediante una Radio Definida por Software (SDR) utilizando el programa de software libre GNU (GNU no es Unix) Radio en conjunto con un dispositivo sintonizador RTL2832U R820T2, una antena telescópica y un ordenador de placa reducida (SBC). El analizador de espectro desarrollado permite visualizar el espectro de radiofrecuencia dentro del rango de 80 MHz a 1.1 GHz para señales de tipo Frecuencia Modulada (FM), Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), Radio Troncal Terrestre (TETRA), Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS) y de Televisión Digital Terrestre (TDT).

**Palabras Claves:** Analizador de espectro, GNU Radio, RTL2832U, SBC, SDR.

### **Abstract**

*The objective of this work is the development of a spectrum analyzer, which also works remotely to monitor radio frequency electromagnetic signals through a*

*Software Defined Radio (SDR) that uses the free software program GNU (GNU's not Unix) Radio in conjunction with a RTL2832U R820T2 tuner device, a telescopic antenna and a Single Board Computer (SBC). The developed spectrum analyzer allows to visualize the radio frequency spectrum within the range of 80 MHz to 1.1 GHz for Frequency Modulation (FM), Global System for Mobile Communications (GSM), Terrestrial Trunked Radio (TETRA), Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) and Digital Terrestrial Television (DTT) signals.*

**Keywords:** *GNU Radio, RTL2832U, SBC, SDR, Spectrum analyzer.*

## **1. Introducción**

Para poder visualizar señales de radio frecuencia con el fin de medir la intensidad de campo generado por algún dispositivo eléctrico o electrónico, los armónicos de un transmisor, identificar estaciones que se encuentran en una determinada banda de frecuencias, entre otras más; se utiliza un analizador de espectro. Actualmente existen diversos tipos de analizadores [Electronica.org, 2016] a un costo elevado, pero gracias al constante avance de la ciencia y tecnología, es posible desarrollar un analizador de bajo costo mediante técnicas de radio definida por software (Software Defined Radio, SDR) sin tener todas las prestaciones de los modelos comerciales, pero si las suficientes para el trabajo de un radioaficionado e incluir la posibilidad de realizar mediciones remotamente facilitando la obtención de estos datos para su uso en cualquier lugar y en cualquier momento.

Existen diversas definiciones para describir la Radio Definida por Software [Wipro Technologies, 2002] [Ulversoy, 2010] [Mitola, 2000], la que ofrece una visión clara es la siguiente: Una radio en la que algunas o todas las funciones de la capa física están definidas por software [Wireless Innovation Forum, s.f.]. SDR propone un modelo de sistema programable para la generación y recepción de señales de radiofrecuencia que permite que componentes físicos como filtros, atenuadores, sincronizadores, moduladores y demoduladores, entre otros, se implementen digitalmente lo más cerca posible de la antena para reemplazar hardware por software. Esto permite que un sistema de comunicación basado en esta técnica

modifique su funcionamiento y características dinámicamente desde una computadora. Existen varios programas que permiten usar un SDR, algunos de ellos son:

- **SDR #** el cual es un software de análisis y demodulación de señal que se especializa en mostrar y sintonizar señales en modulación de frecuencia de banda estrecha (NFM), modulación de frecuencia de banda ancha (WFM), amplitud modulada (AM), banda lateral inferior (LSB) y banda lateral superior (USB), permite grabar el audio de la señal sintonizada y muestra su espectro de frecuencia, así como una ventana que muestra el gráfico de espectro RF distribuido en el tiempo con nuevos datos en la parte superior y datos antiguos en la parte inferior, al igual que una cascada [RTL-SDR.com, 2018]. La figura 1 muestra la ventana de trabajo del software SDR#.

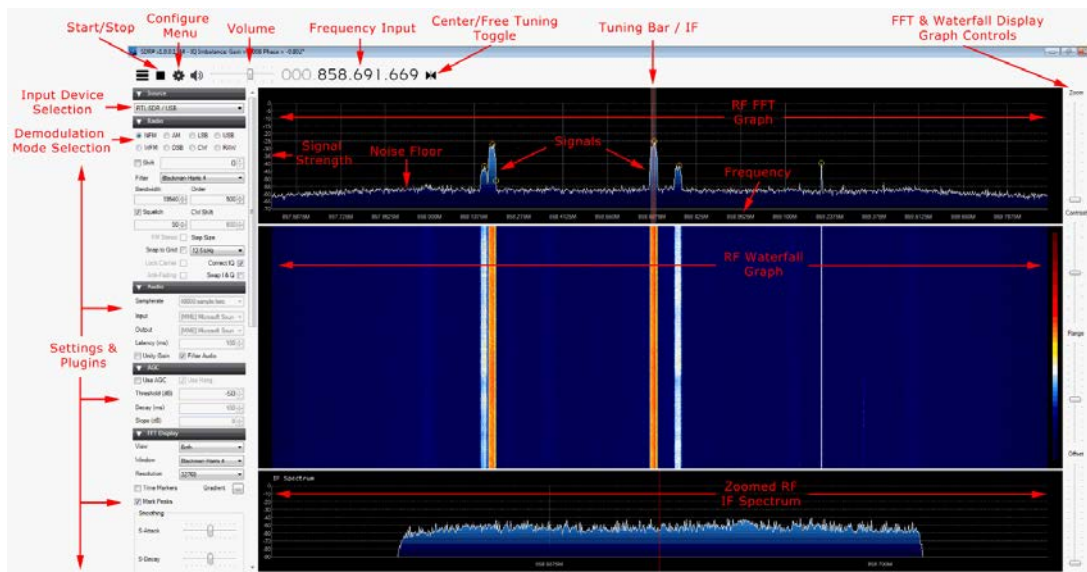


Figura 1 Ventana del software SDR#.

- **GQRX** es un receptor SDR gratuito y fácil de usar que se ejecuta en sistemas Linux y Mac. Es similar a SDR # en términos de características y simplicidad de uso. GQRX viene con un espectro FFT estándar y una pantalla de cascada y una serie de configuraciones de filtro comunes [Csete, s.f.]. La figura 2 muestra la ventana de trabajo del software GQRX.

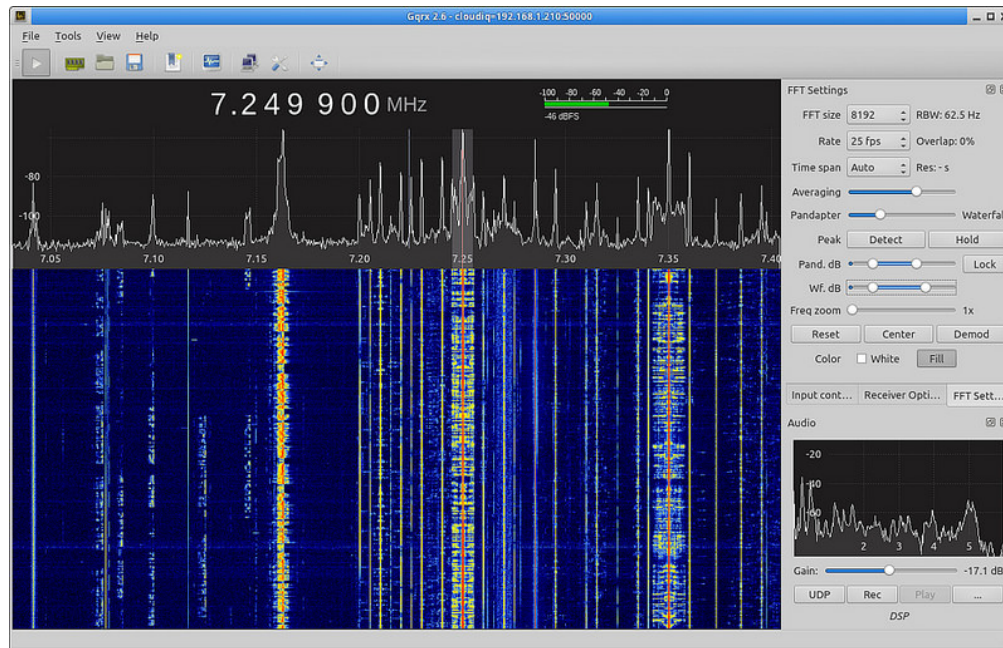


Figura 2 Ventana del software GQRX.

- **GNU Radio** que es un software SDR que se destina principalmente a fines educativos y de investigación, es un potente paquete de procesamiento de señales digitales (DSP) para crear radios definidas por software. Los programas de procesamiento de señales digitales se pueden escribir visualmente utilizando diagramas de bloques en el entorno grafico GNU Radio Companion [The GNU Radio Foundation, s.f.].

## 2. Métodos

Las mayores diferencias entre GNU Radio y otro tipo de software similar radican en que GNU Radio permite crear la aplicación SDR que se necesita y no solo limitarse a una aplicación específica. Proporciona un mayor poder de modificación de todos los parámetros involucrados a través de los bloques de procesamiento los cuales aumentan constantemente porque son software libre y cada vez hay más colaboradores que los desarrollan; lo que hace que este software sea el más adaptable y por ello su uso en el desarrollo de este trabajo.

El dispositivo que servirá para captar las señales de radio frecuencia es el receptor RTL-SDR Blog V3 basado en el chipset RTL 2832U como se muestra en la figura

3, que cuenta con un sintonizador R820T2, para recepción de frecuencia dentro del rango de 24 MHz a 1.760 GHz, conexión al ordenador por USB, convertidor analógico-digital de 8 bit y para una frecuencia de muestreo de hasta 3.19 millones de muestras por segundo [Machado, 2015].



Figura 3 Receptor RTL-SDR Blog V3.

El ordenador de placa reducida (SBC) es uno marca LIVA modelo Z cuyas características principales son: procesador Intel Celeron, memoria interna de almacenamiento de 32 GB, memoria RAM de 3 GB y compatibilidad con sistemas operativos Windows 10 y Ubuntu [ELITEGROUP, s.f.] el cual puede observarse en la figura 4. El analizador de espectro mediante SDR utilizando GNU Radio se muestra en la figura 5.



Figura 4 Ordenador de placa reducida LIVA Z.

El funcionamiento, así como, los parámetros de cada bloque son los siguientes:

- **Bloque Options**, es uno generado por defecto y es el encargado de crear el archivo en lenguaje python del programa.
- **Bloque Variable**, este bloque define una variable y su valor, se utiliza principalmente para definir el valor inicial de las variables utilizadas en los demás bloques permitiendo modificar los datos de estos de manera sencilla, para este trabajo se definen cinco variables de este tipo que corresponden al valor inicial de frecuencia central y valores para los filtros utilizados.

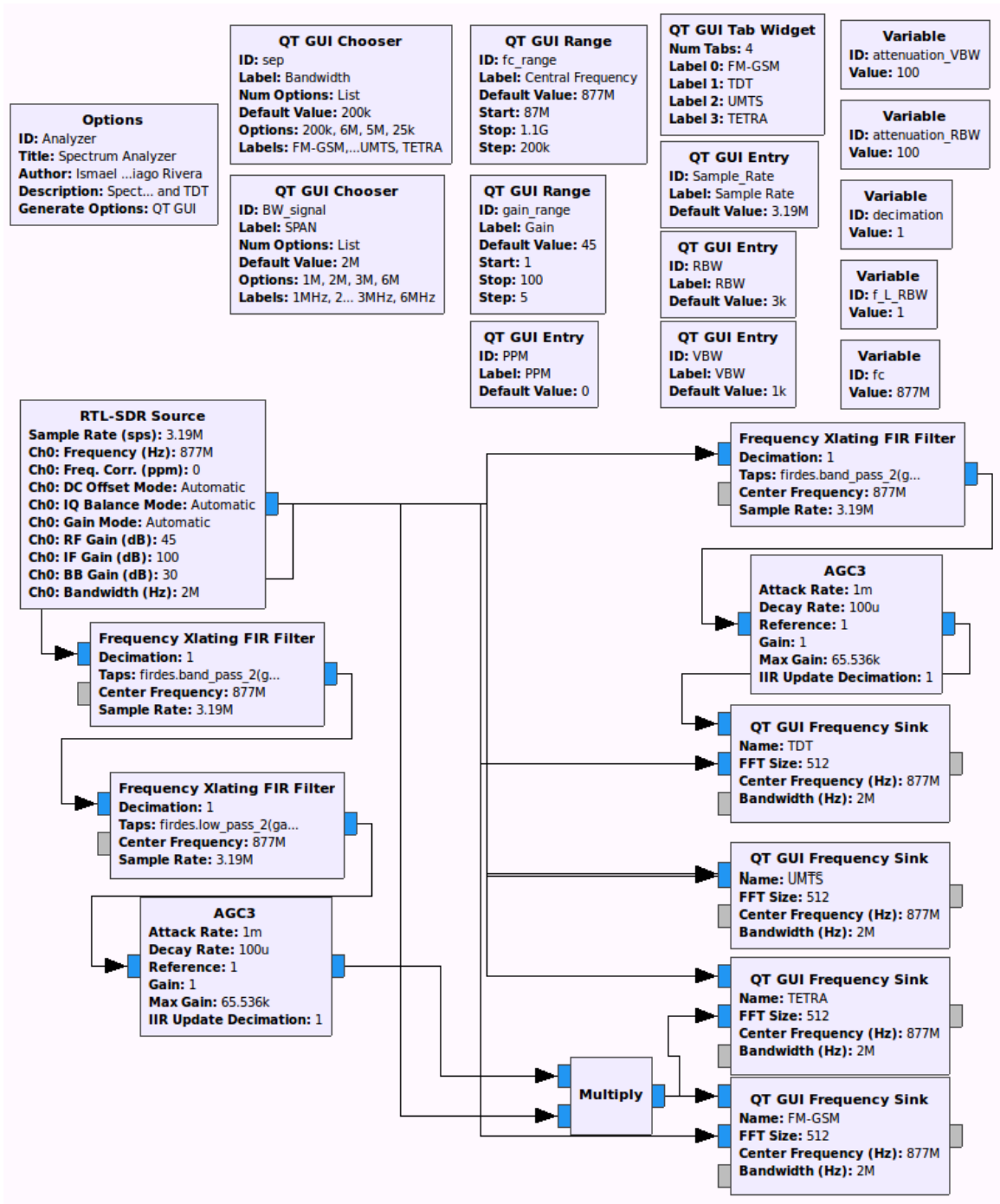


Figura 5 Analizador de espectro en GNU Radio.

- **Bloque de variables tipo QT GUI Chooser**, permite definir un conjunto de valores posibles para una variable que pueden ser modificados desde la interfaz gráfica del analizador de espectro. Se usaron dos de estos bloques



para dar opción de cambiar el ancho de banda de visualización, así como, la frecuencia de corte para los filtros. Un ejemplo de la implementación de este tipo de bloque se puede apreciar en la figura 6.

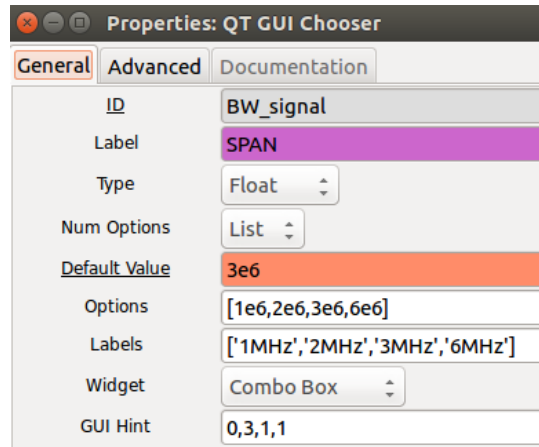


Figura 6 Configuración del bloque QT GUI Chooser, ancho de banda de visualización.

- **Bloque de variables tipo QT GUI Range**, brinda la posibilidad de modificar el valor de una variable mediante una barra deslizable o tecleando al valor deseado desde un cuadro de texto, de igual forma se muestra en la interfaz gráfica. Utilizando dos de estos bloques es posible modificar el valor de la frecuencia central que se quiere visualizar y de la ganancia para la señal de entrada. Un ejemplo de implementación se muestra en la figura 7.

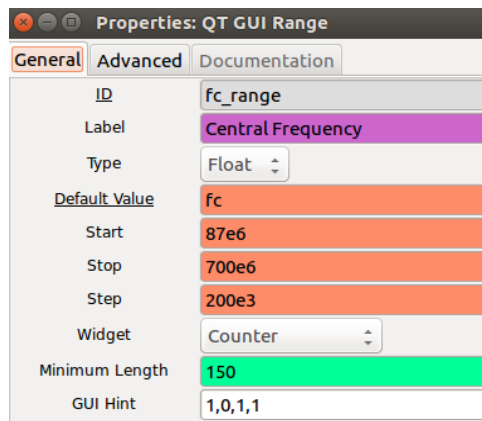


Figura 7 Configuración del bloque QT GUI Range para la frecuencia central de la señal.

- **Bloque RTL-SDR Source**, representa nuestra señal de entrada donde se definen los parámetros para el receptor, como lo son, frecuencia de muestreo, frecuencia de la señal, ganancia, ancho de banda, número de canales, entre otros. La configuración de este bloque se puede observar en la figura 8.

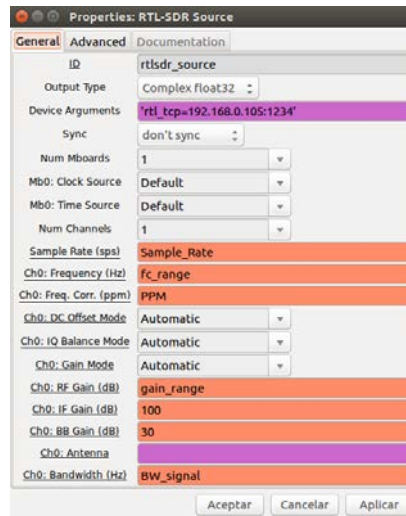


Figura 8 Configuración del bloque RTL-SDR Source.

- **Bloque de variables tipo QT GUI Entry**, es un cuadro de edición que permite a un usuario establecer directamente un nuevo valor para el parámetro. Se utilizan tres bloques de este tipo para los parámetros de transición de los filtros y para dar la posibilidad de corregir desfase de las señales en partes por millón (PPM).
- **Bloque Frequency Xlating FIR Filter**, este bloque permite simular diversos tipos de filtros. En la documentación doxygen [Doxygen, 2016] de GNU Radio se establece que para filtros pasa banda y pasa bajos se definen de la siguiente manera:
  - ✓ `Firdes.band_pass_2`(ganancia, frecuencia de muestreo, frecuencia de corte inferior, frecuencia de corte superior, tamaño de transición, tipo de ventana o atenuación).
  - ✓ `Firdes.low_pass_2`(ganancia, frecuencia de muestreo, frecuencia de corte, tamaño de transición, tipo de ventana o atenuación).

La implementación de este tipo de bloque se muestra en la figura 9.

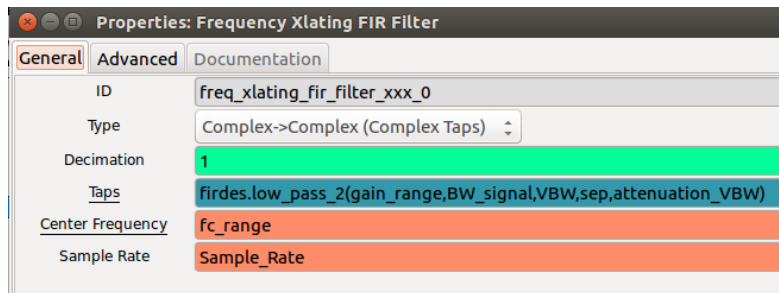


Figura 9 Configuración del bloque Frequency Xlating FIR Filter (Filtro pasa bajos).

- **Bloque AGC3**, implementa un control automático de ganancia.
- **Bloque QT GUI Frequency Sink**, es el encargado de desplegar la interfaz gráfica del analizador de espectro, dónde se visualizará la señal y los parámetros que se pueden modificar. Se utilizan cuatro bloques para poder visualizar el tipo de señal deseada. Un ejemplo de la configuración de este bloque se muestra en la figura 10.

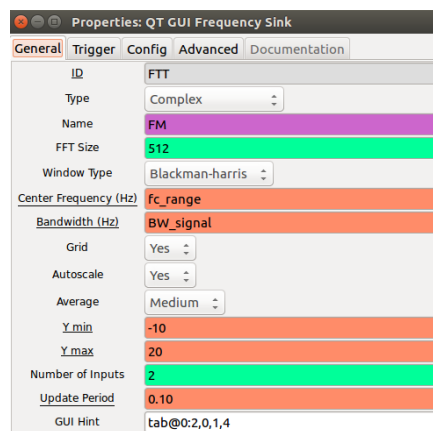
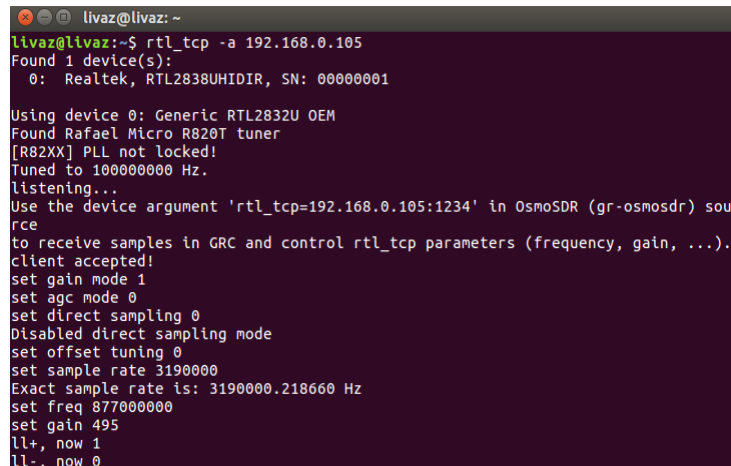


Figura 10 Configuración del bloque QT GUI Frequency Sink.

- **Función de Monitoreo Remoto**, el programa permite una visualización remota o inalámbrica mediante terminal o consola de Ubuntu utilizando el comando: `rtl_tcp -a IP del SBC` dónde se encuentra conectado el sintonizador y la antena, una vez presionada la tecla enter aparece información como la que se muestra en la figura 11 para poder establecer la

conexión, dónde la más importante es la instrucción 'rtl\_tcp=192.168.0.105:1234' que se requiere en el campo device argument del bloque source dentro de GNU Radio en otro ordenador sin la necesidad de tener el sintonizador y la antena conectada.



```
livaz@livaz: ~  
livaz@livaz:~$ rtl_tcp -a 192.168.0.105  
Found 1 device(s):  
 0: Realtek, RTL2838UHIDIR, SN: 00000001  
  
Using device 0: Generic RTL2832U OEM  
Found Rafael Micro R820T tuner  
[R82XX] PLL not locked!  
Tuned to 100000000 Hz.  
listening...  
Use the device argument 'rtl_tcp=192.168.0.105:1234' in OsmoSDR (gr-osmosdr) source  
to receive samples in GRC and control rtl_tcp parameters (frequency, gain, ...).  
client accepted!  
set gain mode 1  
set agc mode 0  
set direct sampling 0  
Disabled direct sampling mode  
set offset tuning 0  
set sample rate 3190000  
Exact sample rate is: 3190000.218660 Hz  
set freq 877000000  
set gain 495  
ll+, now 1  
ll-, now 0
```

Figura 11 Configuración de la función remota.

### 3. Resultados

Una vez terminada la configuración de los bloques y ejecutado el programa se despliega gráficamente el analizador de espectro. El analizador desarrollado funciona a través de ventanas, cuatro en total que corresponden al tipo de señal a captar; los tipos de señales permitidos debido a las características del dispositivo SDR-RTL V3 y al ancho de banda de cada tipo de señal son FM (200 kHz), GSM (200 kHz), TDT(6 MHz), UMTS (5 MHz) y TETRA (25 kHz) que están presentes dentro del rango establecido de 80 MHz a 1.1 GHz [IFT, Octubre 2016] [IFT, Diciembre 2016]. Se realizaron varias mediciones en diferentes frecuencias del espectro electromagnético con el fin de verificar el funcionamiento y establecer los parámetros óptimos de SPAN de visualización, tasa de muestreo, características de ancho de banda del tipo de señal a identificar y valores para la frecuencia de corte de los filtros para cada tipo de señal permitido. La primera prueba consiste en identificar señales FM, la figura 12 muestra cuatro señales captadas para una frecuencia central de 93.7 MHz y un valor de SPAN de 3 MHz. La siguiente prueba es la identificación de señales GSM, la figura 13 muestra dos señales de este tipo

con una frecuencia central en 877 MHz y SPAN de 2 MHz. El siguiente tipo de señal a identificar son señales de TDT y los resultados se muestran en la figura 14 para una frecuencia central de 587.1 MHz y SPAN de 6 MHz. El cuarto tipo de señal corresponde a UMTS dónde al realizar una llamada se puede identificar una señal de este tipo como lo comprueban las figuras 15 y 16. Por último se identificaron señales de tipo TETRA en una frecuencia central de 852.5 MHz y SPAN de 1 MHz como se muestra en la figura 17. La función de monitoreo remoto forma parte de la última prueba con una conexión wifi de velocidades de descarga de 8.95 Mbps y 0.70 Mbps de carga; la figura 18 muestra un resultado de esta función para señales TETRA en la misma frecuencia que la prueba anterior.

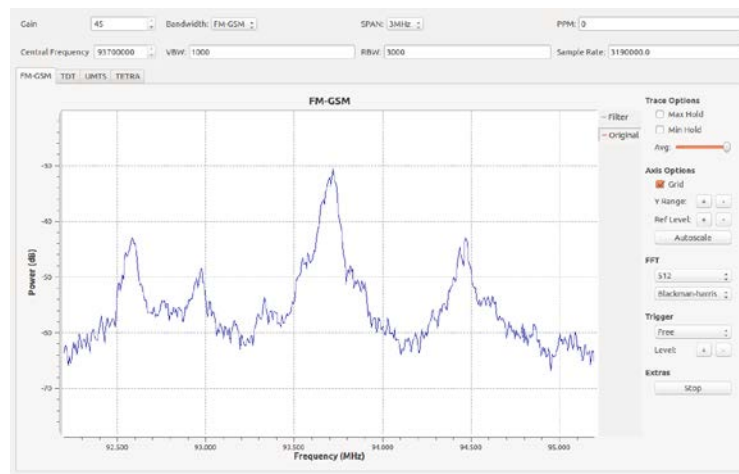


Figura 12 Señales FM con frecuencia central en 93.7 MHz y SPAN de 3 MHz.

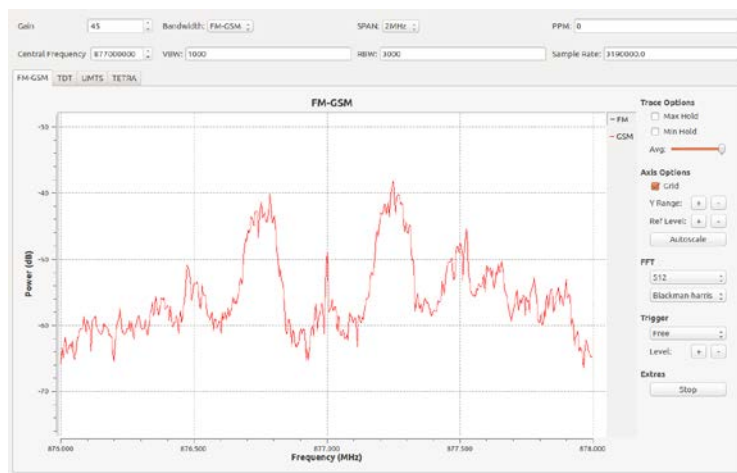


Figura 13 Señales GSM con frecuencia central en 877 MHz y SPAN de 2 MHz.

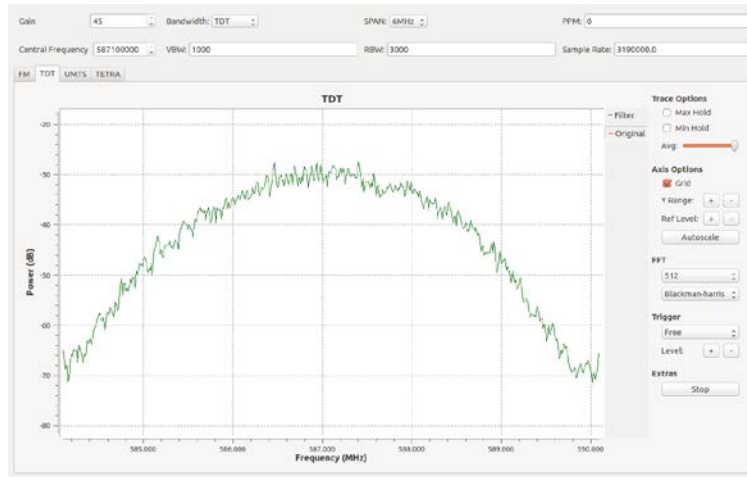


Figura 14 Señal TDT con frecuencia central en 587.1 MHz y SPAN de 6 MHz.

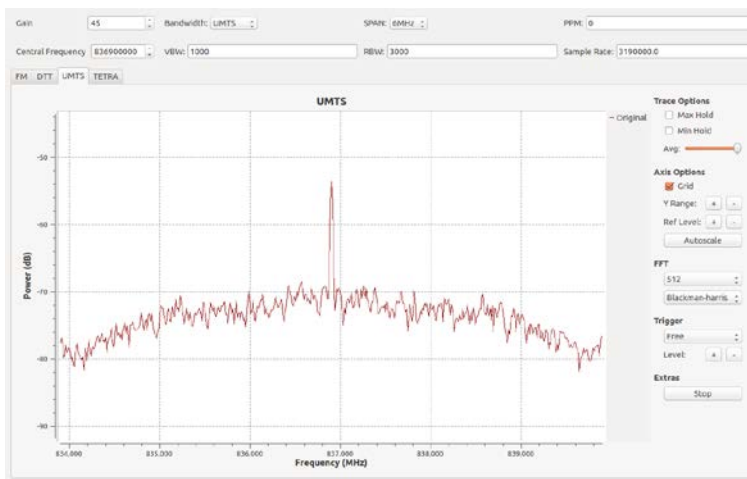


Figura 15 UMTS frecuencia central 836.9 MHz y SPAN 6 MHz antes de realizar llamada.

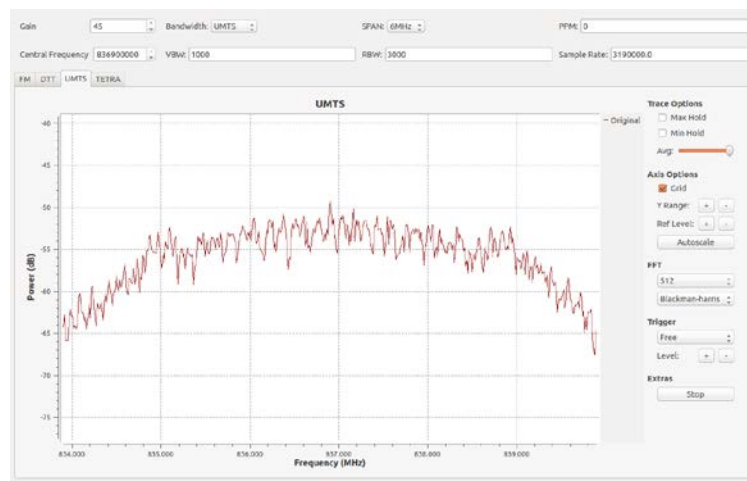


Figura 16 UMTS con frecuencia central 836.9 MHz y SPAN 6 MHz durante llamada.

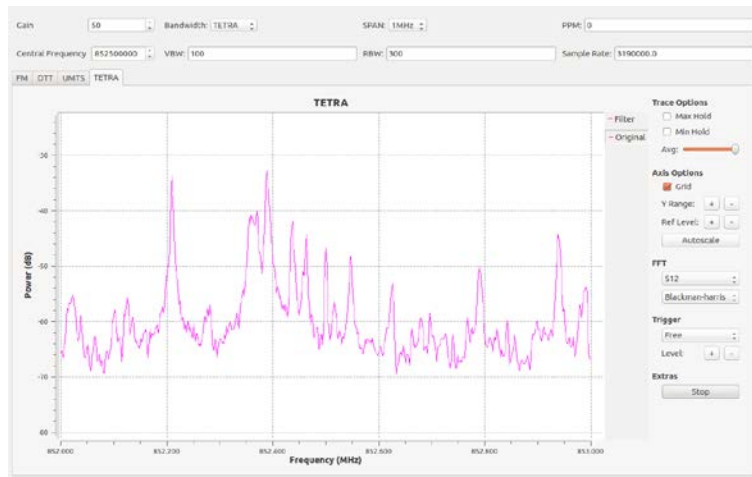


Figura 17 Señales TETRA con frecuencia central en 852.5 MHz y SPAN de 1 MHz.

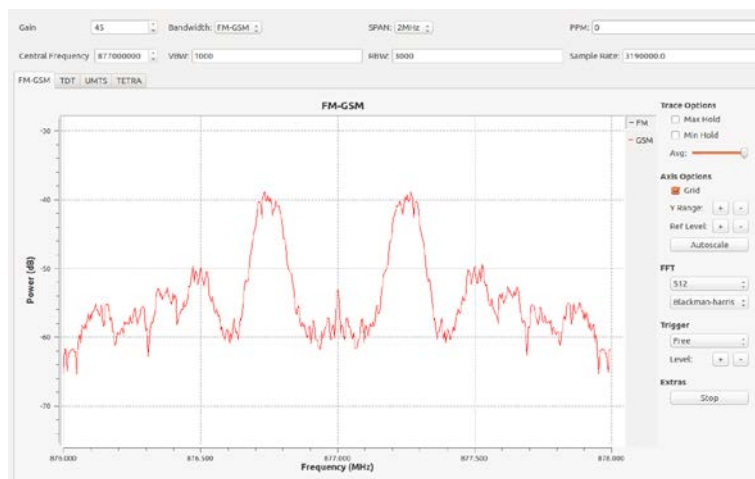


Figura 18 Señales TETRA obtenidas mediante la función remota.

#### 4. Discusión

En general, las pruebas realizadas determinaron lo siguiente: primero se establece un valor de 3.19 millones de muestras por segundo como la máxima tasa de muestreo y 1 millón de muestras por segundo como la mínima, fuera de estos valores GNURadio o la ventana de la terminal donde se ejecuta la configuración remota muestra el mensaje Invalid sample rate. Se establece 3.19 millones de muestras por segundo como la tasa de muestreo por defecto para todos los tipos de señal ya que es el valor máximo y significa la máxima calidad de visualización que el analizador puede presentar, además que en ninguna prueba

se identificaron fallas a este valor de tasa de muestreo. El valor para la frecuencia de corte de los filtros pasa bajas y pasa banda son de 1 y 3 kHz y son establecidas mediante los recuadros RBW y VBW de la interfaz del analizador respectivamente exceptuando señales TETRA, dónde se recomiendan valores de 100 Hz y 300 Hz debido a que el ancho de banda de este tipo de señal (25 kHz) es el de menor tamaño. También se establece que no todas las señales requieren el uso de todos los tipos de bloques, por ejemplo, para señales de UMTS con la señal directa obtenida del bloque source se obtiene el mejor resultado y no es necesario el filtro pasa banda que las señales de TDT necesitan para una mejor apreciación a pesar de tener características de ancho de banda similares, otro ejemplo es para las señales TETRA y FM que al tener anchos de banda menores a los 300 kHz y ya que el mínimo SPAN de visualización del analizador es de 1 MHz; se necesitan tanto de un filtro pasa bajas como de uno pasa banda y un bloque de multiplicación que en conjunto permiten identificar señales adyacentes y que no se requieren en UMTS o TDT debido al máximo SPAN de 6 MHz que soporta el dispositivo RTL-SDR V3 y el analizador desarrollado además del el tamaño de ancho de banda de estas señales. Por último, las pruebas establecen que se obtienen los mismos resultados tanto en el modo presencial como en el remoto para una red con velocidades de descarga de 8.95 Mbps y 0.70 Mbps de carga en el SBC dónde se conecta la antena y el dispositivo RTL-SDR V3; las figuras 13 y 18 comprueban este resultado.

## **5. Conclusiones**

Como se mencionó al inicio, el adquirir un analizador de espectro comercial y especializado presenta una dificultad para un radioaficionado, principalmente debido a sus precios. Es por ello que al implementar uno mediante las técnicas de SDR y de elementos como los ordenadores de placa reducida se puede tener uno de bajo costo que permita al radioaficionado realizar mediciones básicas teniendo en cuenta las limitaciones que pueda tener, principalmente en cuanto a precisión y rendimiento, además, el analizador desarrollado funciona como sonda de monitoreo permitiendo tanto el uso presencial como el remoto que facilita la



obtención y manejo de los datos con la limitante de una conexión a la vez. En base a los resultados, el analizador o sonda de monitoreo permite identificar señales de tipo FM, GSM, TETRA, UMTS y de TDT, trabaja en un rango de frecuencias entre 87 MHz y 1.1 GHz con ancho de banda de visualización mínimo de 1 MHz y máximo de 6 MHz y tasas de muestreo desde 1 millón de muestras por segundo, hasta 3.19 millones de muestras por segundo. El dispositivo RTL-SDR V3 funciona correctamente para identificar señales a pesar de presentar desviaciones de frecuencia entre 5 kHz y 100 kHz principalmente en FM y TETRA. Aunque en las imágenes 12 a 17 se definen los valores para el mejor funcionamiento del analizador para cada tipo de señal, todos ellos pueden ser modificados. Por último, mencionar que un ordenador de placa reducida no presenta limitaciones en comparación con ordenadores de escritorio a la hora de ejecutar el programa, sino al contrario, su tamaño reducido brinda mayor portabilidad.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Analizador de espectros, Definición, Tipos y Características, septiembre 2016:<https://ingenieriaelectronica.org/analizador-de-espectros-definicion-tipos-y-caracteristicas/>.
- [2] Csete, Alexandru. Welcome to gqrx: <http://gqrx.dk/>.
- [3] Doxygen. GNU Radio Manual and C++ API Reference Documentation 3.7.10.1, Modules, Digital Filter Design, agosto 2016.
- [4] ELITEGROUP. System-Liva Z specification: [http://www.ecs.com.tw/ECSWebSite/Product/Product\\_SPEC.aspx?DetailID=1741&CategoryID=-1&DetailName=Feature&MenuID=1&LanID=0](http://www.ecs.com.tw/ECSWebSite/Product/Product_SPEC.aspx?DetailID=1741&CategoryID=-1&DetailName=Feature&MenuID=1&LanID=0).
- [5] IFT, Disposición Técnica IFT-013-2016: Especificaciones Y Requerimientos Mínimos Para La Instalación Y Operación De Estaciones De Televisión, Equipos Auxiliares Y Equipos Complementarios. 30 diciembre 2016.
- [6] Machado, José Raúl. Software Defined Radio: Basic Principles and Applications. *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)* Vol 24. No 38 pp. 79-96, enero-abril 2015.

- [7] IFT, Programa Anual 2017. Anexo III. Descripciones Técnicas del Programa 2017, 27 octubre 2016.
- [8] Mitola, J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio. Tekn. Dr. dissertation. Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [9] RTL-SDR.com. SDRSHARP Users guide, mayo 2018: <https://www.rtl-sdr.com/sdrsharp-users-guide/>.
- [10] T. Ulversoy. Software Defined Radio: Challenges and Opportunities. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol 12, no. 4, pp. 531-550, 2010.
- [11] Wipro Technologies, Software-Defined Radio: a Technology Overview, Broadcast Papers, Wipro Technologies, December 2002.
- [12] The GNU Radio Foundation. What is GNU Radio? <https://gnuradio.org/about/>.
- [13] Wireless Innovation Forum. What is Software Defined Radio?: [http://www.wirelessinnovation.org/Introduction\\_to\\_SDR](http://www.wirelessinnovation.org/Introduction_to_SDR)

# **DISEÑO EN VHDL DE UNA INTERFAZ DE DATOS SERIE-DAC PARA UN CONTROL BARRA-ESFERA**

## *VHDL DESIGN OF A SERIAL-DAC DATA INTERFACE FOR A BALL AND BEAM CONTROL*

**Juan Sifuentes Mijares**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna  
*jsifuentesm@correo.itlalaguna.edu.mx*

**Jean Philippe Andre Paistel Sanchez**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna  
*phil.ppe@outlook.com*

**Daniel Flores Montes**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de la Laguna  
*daniyfm5@gmail.com*

### **Resumen**

En este documento se presenta la descripción del desarrollo de un circuito interface realizado sobre una tarjeta FPGA SpartanXC3S200. El circuito digital está diseñado en VHDL; las operaciones que realiza el circuito son transferencia y conversión de datos entre dos computadoras. Todo el conjunto implementa un control por visión de un sistema barra-esfera. La interface recibe los datos del procesamiento digital de imágenes "PDI", realizado en una primera PC. Los datos son la posición del centro geométrico de la esfera. Estos datos son agrupados y convertidos a señales analógicas, para ser transferidas a una tarjeta adquisitora PCI instalada en la segunda PC. Esta segunda computadora es usada para implementar los algoritmos de control y proporcionar la señal del par para el motor. La interface realiza también la decodificación del encoder de posición de la barra y la transforma a señal analógica para enviarla a una tarjeta PCI.

**Palabras Claves:** barra-esfera, control, FPGA, VHDL.

### **Abstract**

*In this paper, we present a description of a developed interface circuit which was created in a SpartanXC3S200 FPGA board. The digital circuit is design in VHDL;*

*the operations that the circuit develops are the transfer and conversion of data between two computers. All set implement a vision control of a ball & beam system. The interface receives the data from the image processing "PDI" developed by a first PC. The dates are position of geometric center of the ball. These data are grouped and converted to analog signals to be transferred to a data acquisition PCI card installed in a second PC. This second computer is used to implement the control algorithms and to provide the torque signal for the motor. The interface also performs the decoding of position encoder of the beam, and transforms it to analog signal to send to the PCI card.*

**Keywords:** Control, FPGA, VHDL.

## **1. Introducción**

El balanceo de una esfera sobre una barra es un sistema clásico de control sub actuado, ya que no se tiene directo control sobre la esfera, es indirecto a través de un motor conectado a la barra. El problema de control de este sistema ha sido abordado de muchas formas [Oliveira, 2017], [Srivastava, 2015], [Boumazbar, 2015], [Ezzabi, 2013], [Ogata, 2010], [Kim, 2007], y en el presente trabajo se hace mediante una cámara para determinar la posición de la esfera en la barra. Por otra parte también diversos trabajos sostienen la rentabilidad de trabajar con circuitos de lógica programable FPGAs y VHDL para mejorar las prestaciones de carga de trabajo y velocidad [Delgado, 2016], [Hernández, 2016], [Mohammad, 2014], [Pong, 2008], [Maxinez, 2006], [Brown, 2006]. Considerando los trabajos anteriores, se decidió repartir la carga de trabajo en varios sistemas y se ha utilizado un dispositivo de lógica programable FPGA. La distribución de tareas es de la siguiente forma (figura 1): En una primera computadora se realiza el procesamiento digital de la imagen y se determina la posición del centro de la esfera. En una segunda computadora se implementa el algoritmo de control que va a ser probando. Un tercer sistema lo conforma la interface digital implantada en la tarjeta FPGA Spartan XC3S200 y diseñada en VHDL. Esta interface proporciona el enlace de datos de los dos primeros sistemas y también se encarga de leer el encoder de posición de la barra. Con la distribución de trabajo anterior

se logra aligerar la carga de trabajo en las computadoras y aumentar la velocidad de procesamiento haciendo posible el controlar la posición de la esfera en la barra.

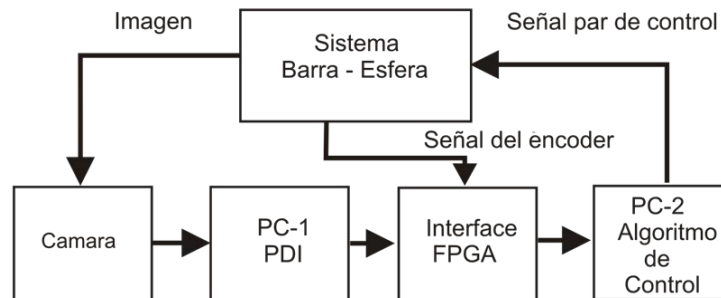


Figura 1 Diagrama del sistema completo de control por visión del sistema barra-esfera.

En si el trabajo que se presenta es: El diseño de la interface que hace posible la transferencia de datos entre el sistema de control y el sistema de PDI; y que en esta configuración de carga de trabajo distribuido, con un circuito de lógica programable FPGA usado para la interface, con esta configuración, si se consigue el funcionamiento del sistema del control barra esfera, ya que en previas pruebas, empleando configuraciones de carga de trabajo; en una sola computadora o dos sin interface, no fue posible lograr su funcionamiento. Adicionalmente la interface también realiza el trabajo del decodificador de encoder para la lectura de la posición del motor que mueve la barra sobre la cual rueda la esfera.

## 2. Métodos

A continuación, se explica la metodología que se siguió en la configuración para lograr el buen funcionamiento del sistema, así como los procedimientos empleados en los diseños de los diferentes componentes digitales y analógicos realizados para la interface.

Un diagrama a bloques del circuito digital de la interface es mostrado en la figura 2; en donde se muestran los puertos de entrada a la izquierda y puertos de salida a la derecha del bloque, las dimensiones son de 1 bit, 8 bits y 10 bits.

Entre los puertos de entrada se encuentran las terminales 'A' y 'B', usadas para la lectura del encoder de posición del motor que mueve la barra.

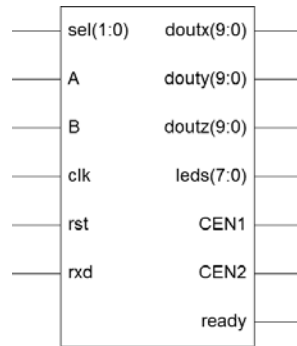


Figura 2 Diagrama externo de la interfaz serie-DAC.

La lectura de los datos de las coordenadas de posición X e Y están en formato serie RS-232 y provienen de la computadora que realiza el procesamiento digital de las imágenes (PDI), estas coordenadas llegan al puerto de entrada 'rxd'. El puerto 'rst' tiene la función de reiniciar el circuito. El puerto 'clk' se alimenta con una señal de reloj de 50Mhz que llega a todos los procesos secuenciales y de sincronización. Las terminales 'sel' seleccionan algunas señales internas a ser monitoreadas mediante las terminales de salida 'leds'. Los puertos de salida 'doutx', 'douty' y 'doutz', cada uno, proporcionan los bits de entrada para un convertidor R-2R. CEN1 y CEN2 son dos terminales que siempre tienen una señal fija en '1', para inhibir un circuito de memoria que comparte algunas de las mismas terminales en la tarjeta de desarrollo que se usan para la interfaz.

La tarjeta de desarrollo usada para implantar el circuito digital es la tarjeta Spartan 3, que lleva un dispositivo de lógica programable FPGA XC3S3200, con un oscilador interno de 50 MHz. En los subtemas siguientes se explica el funcionamiento y código de diseño de los circuitos internos de la interface creada.

### **El circuito decodificador de encoder**

Este circuito es el encargado de llevar la cuenta de los pulsos generados por el encoder de posición del motor que mueve la barra del sistema, figura 3. En el procedimiento de lectura del encoder se realiza un continuo muestreo de las señales A y B con dos registros de corrimiento, para almacenar las señales presentes y pasadas, este muestreo se realiza a una frecuencia de 50 MHz. Un circuito comparador se encarga de detectar las diferencias entre los registros

presente y pasado, en cualquiera de las señales A o B. El mismo circuito comparador también produce un incremento o decremento del registro que lleva posición, según corresponda al movimiento del encoder y que está directamente relacionado con la secuencia de cambios en de las señales A y B.

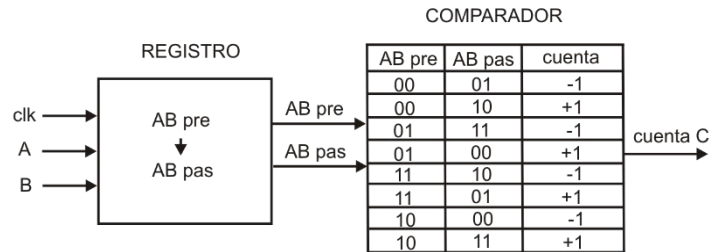


Figura 3 Diagrama funcional del circuito decodificador de encoder.

El aumento en la precisión usando este método se puede ver si consideramos que un pulso completo de la señal A o B implica dos cambios para volver al mismo estado, y puesto que son dos señales del encoder, entonces suman 4 cambios por cada pulso completo, este procedimiento multiplica la precisión del decodificador del encoder por 4. La frecuencia de muestreo limita en velocidad a las señales entrantes A y B del decodificador de encoder, de tal forma que no podría funcionar correctamente si este límite es superado.

Un diagrama funcional del circuito decodificador de encoder es mostrado en la figura 3 y a la vez el código en VHDL del proceso que implementa este circuito es mostrado tabla 1, en este se pueden distinguir las señales ABpre y ABpas, las cuales son las señales A&B muestreadas presentes y pasadas. El funcionamiento es sencillo y es que cuando estas son diferentes estas producen un cambio +1 o -1 en la cuenta, esto se puede observar en la estructura del case de esa misma tabla 1.

### El circuito de recepción serie RS-232

La figura 4 muestra un diagrama funcional del circuito de recepción serie. Las características de este circuito de comunicación diseñado son: velocidad de 115200 bits/s con longitud de los datos 8 bits y un '1' en el bit de alto.

El circuito utiliza un pequeño registro de corrimiento en el puerto de entrada de los datos serie rxd en conjunto con una compuerta and de 8 bits para dar la salida. Este registro funciona como un filtro simple para el ruido de alta frecuencia y su funcionamiento es simple.

Tabla 1 Código en VHDL del proceso para crear el circuito decodificador de encoder.

<pre> process(rst, clk, ABpas, ABpre) begin if rst = '1' then cuenta &lt;= (others =&gt; '0'); ABpre &lt;= A&amp;B; ABpas &lt;= A&amp;B; elsif clk'event and clk = '1' then ABpre &lt;= A&amp;B; ABpas &lt;= ABpre; case ABpre is when "00" =&gt; if ABpas = "01" then cuenta &lt;= cuenta -1; elsif ABpas = "10" then cuenta &lt;= cuenta +1; end if; when "01" =&gt; if ABpas = "11" then cuenta &lt;= cuenta -1; elsif ABpas = "00" then </pre>	<pre> cuenta &lt;= cuenta +1; end if; when "11" =&gt; if ABpas = "10" then cuenta &lt;= cuenta -1; elsif ABpas = "01" then cuenta &lt;= cuenta +1; end if; when "10" =&gt; if ABpas = "00" then cuenta &lt;= cuenta -1; elsif ABpas = "11" then cuenta &lt;= cuenta +1; end if; when others =&gt; cuenta &lt;= (others =&gt; '0'); end case; end if; end process; </pre>
--	--

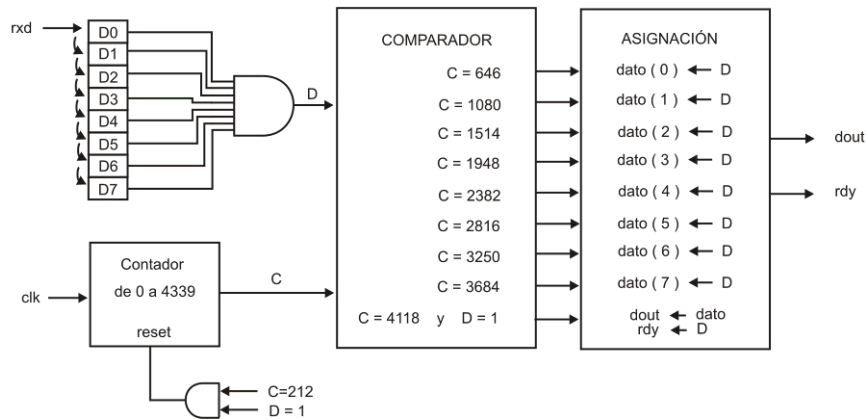


Figura 4 Diagrama funcional del circuito receptor de datos serie.

Para que la salida vaya a '1' se necesita que todos los bits en el registro sean unos, si hay un cambio a cero antes de esto, es decir ruido de una frecuencia alta, tal que no pueda mantenerse un '1' por lo menos por 8 pulsos del reloj, entonces no se producirá el cambio a 1 en la salida, eliminando todos esos cambios de alta frecuencia. El formato de datos serie usado es un bit de inicio '0', seguido de 8 bits de datos iniciando con el menos significativo y al final un '1' como el bit de alto.



El proceso de recepción inicia con un contador que se encuentra detenido, en valor cero, esperando un bit de inicio en el puerto 'rx'd para dar inicio a un conteo hasta la cantidad de 4339. El conteo dura el mismo tiempo que tarda una transferencia de datos serie completa, incluidos los bits de inicio y de alto, con una señal de reloj de 50 MHz, siendo entonces la velocidad de comunicación 115200 bits/s. Un circuito comparador es el encargado ir asignando cada dato en registro de almacenamiento en el tiempo correcto, y también se encarga de dar la salida de datos en paralelo cuando se termina la recepción. La terminal de salida 'rdy' informa con un '1' cuando los datos recibidos están completos y listos en el puerto paralelo 'dout'. En tabla 2 se pueden observar dos procesos, uno que implementa dos circuitos; el primero contiene un contador y un registro de corrimiento para los datos de llegada serie, y el segundo implementa circuito un comparador para la asignación y lectura de los datos en serie, además fuera de los procesos, están las líneas de código que implementan el circuito filtro con compuertas AND.

Tabla 2 Código VHDL del receptor serie.

<pre>process(clk,rst,contador, C) begin if clk='1' and clk'event then   bufer &lt;= bufer(6 downto 0) &amp;   rx'd;   if rst='1' then contador &lt;= 0;   else   if ((contador &lt;= 212) and ( C =   '1'))   or (contador &gt;= 4339)) then   contador &lt;= 0;   else contador &lt;= contador + 1;   end if; end if; end if; end process;  C &lt;= bufer(0) and bufer(1) and bufer(2) and bufer(3) and bufer(4) and bufer(5) and bufer(6) and bufer(7);</pre>	<pre>process(contador,C) begin case contador is when 646 =&gt; dato(0) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 1080 =&gt; dato(1) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 1514 =&gt; dato(2) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 1948 =&gt; dato(3) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 2382 =&gt; dato(4) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 2816 =&gt; dato(5) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 3250 =&gt; dato(6) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 3684 =&gt; dato(7) &lt;= C; aux_rdy &lt;= '0'; when 4118 =&gt; if C = '1' then dout &lt;= dato; rdy &lt;= C; end if; when others =&gt; end case; end process;</pre>
---	---

### El circuito de entramado de datos serie

Los datos que llegan en formato serie son los datos provenientes del PDI que calcula el centro de la imagen de la esfera, las coordenadas cartesianas X e Y.

Cuando un dato serie está completo este se pasa a por un circuito que se encarga de identificarlo. El circuito primero espera por el carácter de inicio de la trama de datos. Una vez que el dato de inicio llegó, el siguiente dato corresponde a la parte menos significativa de la coordenada X, esta se ubica completa en la parte baja de un registro de 10 bits, después llega la parte alta de X y esta se recorta a 2 bits y se ubica en la parte alta del mismo registro, completando 10 bits y continuando con la coordenada Y de igual forma. Al terminar se da salida de datos en paralelo.

En la figura 5 se puede observar el diagrama de estados que explica el funcionamiento del circuito de entramado de datos. En este podemos observar que la señal rdy realiza la función como una la señal de reloj. La señal de rst nos lleva a un estado inicial en donde se queda en espera hasta que el carácter de inicio de trama aparezca, este es una “@”. Una vez que pasa el primer estado la trama de datos llega en forma consecutiva sin ninguna otra condición. La señal Ds representa los datos de la trama.

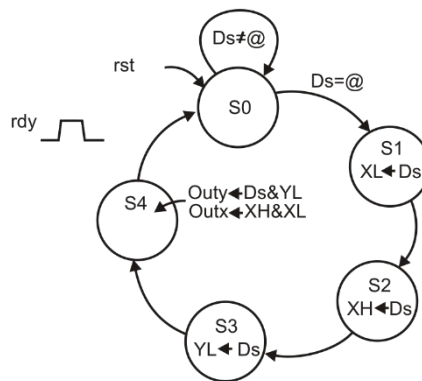


Figura 5 Diagrama de estados del circuito para entramado de datos serie.

En tabla 3 se tiene el código que sintetiza el circuito de entramado de datos. En este se ha implementado una máquina de estados con dos procesos; un primer proceso con un case anidado con la condición de un flanco de subida en la señal rdy es el que implementa las acciones para cada estado, y se observa que solo en primer caso se tiene el condicionante if preguntando por un “01000000” para avanzar al siguiente caso. Mientras que en todos los otros casos solo se guarda el dato y se avanza al siguiente, volviendo caso inicial al terminar. El segundo

proceso de la tabla 3 es el circuito que lleva la actualización del estado presente por el estado siguiente de la máquina de estados usando la señal clk para la actualización de estos.

Tabla 3 Código VHDL del circuito de entramado de datos X e Y.

<pre> process(edopre, rdy, dout ) begin if rdy = '1' and rdy'event then   case edopre is     when s0 =&gt;       AX &lt;= "00000000"; if dout = "01000000" then   edosig &lt;= s1; else   edosig &lt;= s0; end if;   when s1 =&gt;       AX &lt;= "00000001";       XL &lt;= dout;       edosig &lt;= s2;   when s2 =&gt;       AX &lt;= "00000010";       XH &lt;= dout(1 downto 0);       edosig &lt;= s3; </pre>	<pre>   when s3 =&gt;       AX &lt;= "00000011";       YL &lt;= dout;       edosig &lt;= s4;   when s4 =&gt;       AX &lt;= "00000100";       doutx &lt;= XH &amp; XL;       douty &lt;= dout(1 downto 0)&amp; YL;       edosig &lt;= s0;   when others =&gt;       end case;   end if; end process;  process(clk,rst) begin if rst = '1' then edopre &lt;= s0; elsif clk'event and clk='1' then   edopre &lt;= edosig; end if; end process; </pre>
---	---

### El circuito de monitoreo de señales internas

La tabla 4 muestra el código para el diseño del circuito selector de datos de salida a los leds de la tarjeta de desarrollo Spartan 3.

Tabla 4 Código VHDL para monitoreo de señales internas.

<pre> Leds &lt;= cuenta(7 downto 0) else ABpre &amp; "0000"&amp;cuenta(9 downto 8) else dout else AX ; doutz &lt;= cuenta; </pre>	<pre> when sel ="00" when sel ="01" when sel ="10" </pre>
---	---

El circuito es implementado con la finalidad de revisar el buen funcionamiento de los procesos internos, ya implementados físicamente, este incluye la selección de la cuenta, mostrando los primeros 8 bits del contador de pulsos del decodificador de encoder con sel = "00", después con sel ="01" se seleccionan las señales AB actuales leídas del encoder, y los dos bits más altos del resto de la cuenta del decodificador de encoder, luego con sel = "10" se da salida al dato serie recibido y finalmente con sel = "11" se muestra AX que es un indicador del estado presente en la máquina de estados del circuito de comunicación, que se tiene en tabla 3.

## El circuito convertidor de señal digital a señal analógica

Tres circuitos de conversión digital a señal analógica DAC (Digital Analog Conversion) tipo R-2R se han implementado en los puertos de salida digital de la tarjeta Spartan3. Los datos que alimentan a los tres circuitos DAC R-2R son las coordenadas de posición de la esfera X, Y y la cuenta del decodificador del encoder que lleva la posición de la barra.

La precisión del convertidor está dada por la calidad y cantidad de voltaje con el que se alimenta el circuito y la cantidad de bits que se han usado como datos de entrada. En este caso se ha utilizado el voltaje de la tarjeta 3.3 VDC y 10 bits de datos para la resolución, esto proporciona incrementos de  $3.3 / 2^{10}$  VDC = 3.22 mV, es decir 1024 posibles cambios en la escala de 0 a 3.3 VDC. Adicionalmente se han colocado dos capacitores a tierra para reducir el ruido; uno en el voltaje de alimentación de 100 uF y otro de 0.1 uF en la terminal de salida de conversión del DAC.

## 3. Resultados

El circuito diseñado e implementado sobre una tarjeta Spartan 3 XC3S200 encapsulado ft 256 y grado de velocidad -4; presenta como datos de consumo los resultados siguientes:

Número de Slices:	93 out of	1920	4%
Número de Slice Flip Flops:	102 out of	3840	2%
Número de 4 input LUTs:	138 out of	3840	3%
Número de IOs:	48		
Número de bloques IOBs usados:	48 out of	173	27%
IOB Flip Flops:	2		
Número de GCLKs:	2 out of	8	25%

Los datos anteriores permiten ver que los recursos utilizados de la tarjeta de desarrollo fueron menores al 30%. También se muestra el resumen de resultados en consumo de tiempo y velocidad en la implementación, siendo los siguientes:

- Periodo mínimo: 8.130ns (Frecuencia máxima: 123.001 MHz).
- Tiempo mínimo de llegada antes del reloj: 5.422 ns.
- Salida máximo tiempo requerido después del reloj: 9.559 ns.

- Máximo retardo de ruta combinacional: 9.686 ns.

Un controlador tipo PID fue implementado en el sistema de control para probar el funcionamiento del sistema completo. La esfera fue colocada a 10 cm del punto de equilibrio al iniciar el experimento y se le aplicó una perturbación a los 50 s. Los valores usados en las ganancias fueron:  $k_p = 0.131 \text{ Nm}$ ,  $K_v = 0.00355 \text{ Nm-s/rad}$  y  $K_i = 0.05 \text{ Nm/s-rad}$ . La figura 6 muestra la gráfica de posición de la esfera.

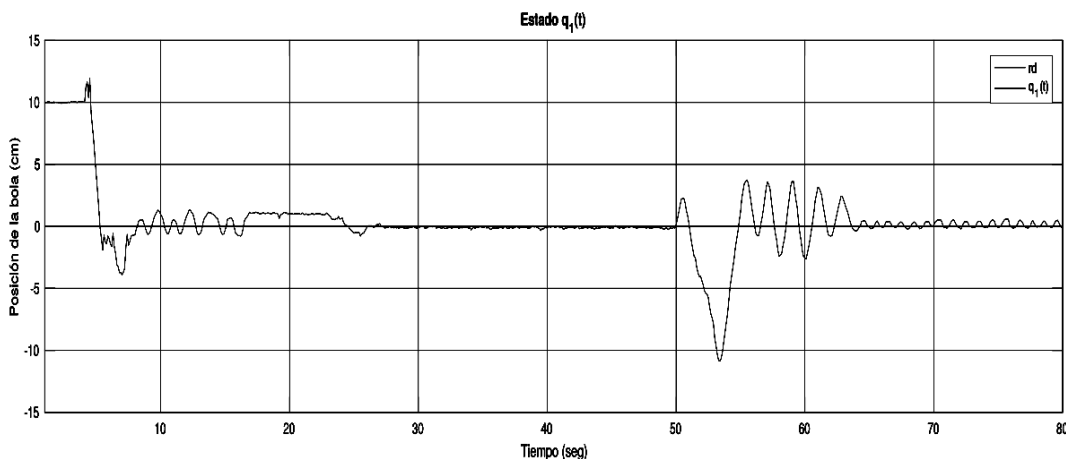


Figura 6 Gráfica de la posición de la esfera para un control PID, con perturbación.

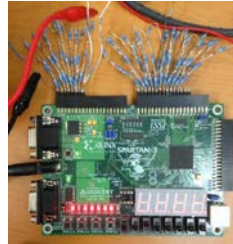
En figuras 7a y 7b se muestran dos fotografías de la tarjeta Spartan 3 en donde se implementó todo el circuito de la Interfaz Serie–DAC y los convertidores R-2R, en figura 7c se puede observar el sistema físico barra esfera, por último, en figura 7d se presenta una pantalla de la computadora con el algoritmo de control en simulink Matlab, utilizado para probar el funcionamiento del control por visión para un sistema barra–esfera,

#### 4. Discusión

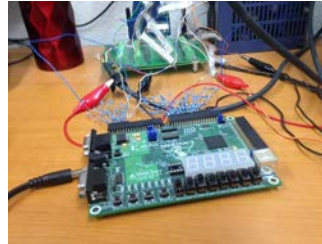
En primera instancia de forma global se diseñado e implantado una interface que realiza la transferencia de información para dos sistemas que realizan el control por visión de un sistema barra-esfera.

Hay que mencionar que todos los circuitos digitales que se han diseñado para este trabajo tienen prestaciones que cumplen adecuadamente con las exigencias del

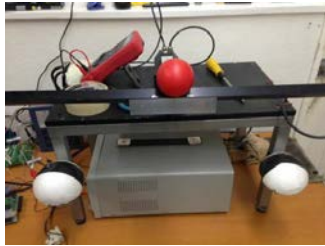
sistema y en algunos casos como el decodificador de encoder superan por mucho las exigencias mínimas de funcionamiento. Todos los circuitos diseñados en VHDL, son diseños propios en VHDL, con los cuales es posible reproducir totalmente todos los circuitos digitales de la interface.



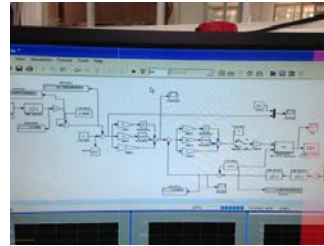
a) Tarjeta SPARTAN3 XC3S200.



b) Interfaces conectadas.



d) Sistema barra-esfera.



d) Diagrama de control en Matlab.

Figura 7 Fotos del sistema físico implementado y del sistema de control barra esfera.

## 5. Conclusiones

Se diseñó e implementó un circuito de una interface de datos serie a DAC, con decodificador de encoder, para ayudar en reducción de la carga de trabajo distribuido entre dos computadoras y de esta forma con todos los elementos en conjunto se consigue el buen funcionamiento del control por visión del sistema barra – esfera. Demostrando así que los dispositivos de lógica programable, en este caso la tarjeta de desarrollo Spartan3 XC3S200 y el lenguaje de descripción de hardware VHDL presentan facilidad para diseñar e implementar circuitos digitales con la versatilidad y buen desempeño que se ha mostrado. Revisando las evidencias del funcionamiento del sistema de control completo presentas, los resultados obtenidos son adecuados y satisfactorios. Las prestaciones de desempeño y velocidad proceso de control se han aumentado al redistribuir entre más elementos la carga de trabajo de los sistemas, esta configuración funcional fue posible gracias a la interface diseñada.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Boumazbar, S., Bouallégue, S., Haggége, J. Co-simulation and rapid prototyping of fuzzy supervised PID controllers based on FPGA-Nexys2 board, pp. 1-6, Tunes, 2015.
- [2] Brown, S. D., Vranesic, Z. G. Fundamentos de lógica digital con VHDL, McGraw Hill, 2006.
- [3] Delgado J., García M., Posada R., Aguilar I. Implementación de un sistema de adquisición de imágenes embebido en un FPGA, *Pistas Educativas* No. 120, 1578-1595, México, 2016.
- [4] Ezzabi, A. A., Cheok K. C., Alazabi F. A. A nonlinear backstepping control design for ball and beam system. *International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 56th, 1318 - 1321, USA, 2013.
- [5] Hernández S., Sifuentes J., Paistel J. Diseño digital de un control de posición para un motor en VHDL y LABVIEW usando FPGA, *Pistas Educativas* No. 120, 227-243, México, 2016.
- [6] Kim J. y Jung, J. S. Hardware implementation of nonlinear PID controller with FPGA based on floating point operation for 6-DOF manipulator robot arm, *Automation and Systems*, Corea del sur, 2007.
- [7] Maxinez D. G. VHDL el arte de programar sistemas digitales, CECSA, 2006.
- [8] Mohammad A. Zare; Rajesh G. Kavasseri; Cristinel Ababei, FPGA-based design and implementation of direct torque control for induction machines, *2014 International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs (ReConFig14)*, pp. 1-6, 2014.
- [9] Ogata, K. *Ingeniería de control moderna*, Madrid: PEARSON, 2010.
- [10] Oliveira J., Balula, S., Fernandes, H. Ball & beam experiment control with current sensing, 4th, *Experiment@International Conference (exp.at'17)*, 258 - 263, Portugal, 2017.
- [11] Srivastava, A., Pratap B. Nonlinear robust observers for ball and beam system: A comparative analysis, *2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS)*, 1 - 6, India, 2015.

# **SOFTWARE DE SIMULACIÓN CENTRADO EN EL APRENDIZAJE DE LAS CONDICIONES DE EQUILIBRIO**

## *SIMULATION SOFTWARE FOCUSED ON THE LEARNING OF EQUILIBRIUM CONDITIONS*

**Javier Silvestre Zavala**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
*jasilvestre@itesi.edu.mx*

**Juan Manuel Banda Chávez**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Irapuato  
*jmanuelnx@gmail.com*

### **Resumen**

En la actualidad, los estudiantes cuentan con un universo de posibilidades para aprender. Una de ellas es el software de simulación que permite, por ejemplo, observar el desempeño de un proyecto o la solución de un problema, que significan un ahorro significativo de tiempo y esfuerzo. En los tecnológicos del país la Física presenta altos índices de reprobación por diferentes circunstancias. Específicamente en los temas de condiciones de equilibrio, los estudiantes encuentran dificultades para lograr un total entendimiento que se traduzca en la solución de ejercicios y desarrollo de proyectos de aplicación. Es por esto, que el presente trabajo de investigación propone una alternativa de software de simulación que permite resolver problemas de cuerpos en equilibrio en dos dimensiones. Este software presenta una solución paso a paso de los mencionados problemas, incluyendo diagramas de cuerpo libre y material de ayuda sobre los temas.

**Palabras Clave:** Equilibrio, simulación, Software.

### **Abstract**

*Currently, the students have a universe of possibilities to learn. One of them is the simulation software that allows, for example, to observe the performance of a project or the solution of a problem, which mean a significant saving of time and*



*effort. In the technological institutes of the country, Physics presents high failure rates for different circumstances. Specifically in the subjects of equilibrium conditions, students find difficulties to achieve a total understanding that translates into the solution of exercises and development of application projects. It is for this reason that the present research project proposes a simulation software as an alternative that allows solving problems of bodies in equilibrium in two dimensions. This software presents a step-by-step solution of the mentioned problems, including free body diagrams and help material on the topics.*

**Keywords:** Equilibrium, simulation, Software.

## **1. Introducción**

La Física es una ciencia que busca descubrir las causas y efectos de los fenómenos naturales desde el mismo origen del universo. Es por esta razón que es una asignatura esencial en los estudios superiores en diferentes ramas, incluyendo las ingenierías. En este orden de ideas, la solución de problemas fisicomatemáticos puede representar un verdadero reto, en ocasiones insalvable, para un gran porcentaje de estudiantes de ingeniería. La solución implica la comprensión y asimilación adecuada de los temas de la asignatura, lo cual se ve afectado por el nivel de complejidad o los múltiples cálculos requeridos. El efecto de las anteriores complicaciones se ve reflejado en los altos índices de reprobación de la mayoría de los tecnológicos del país. En el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato se identificó la dificultad específica de aprendizaje de las condiciones de equilibrio en dos dimensiones. Para coadyuvar a resolver el problema, se desarrolló un software de simulación, ya que la simulación y el aprendizaje son dos conceptos muy unidos en el proceso educativo y, desde el punto de vista puramente instrumental podemos decir que la mayoría de las actividades de aprendizaje siempre están basadas en entidades de simulación [Cabero, 2016]. En la actualidad existen opciones comerciales y libres de software de solución de problemas de Física en general y específicamente de cuerpos en equilibrio. GNU FísicaLab es una aplicación educativa para ordenador para resolver problemas físicos. Su principal objetivo es permitirle al usuario enfocarse en los conceptos

físicos, dejando a un lado los detalles matemáticos [GNU, 2018]. Esta aplicación de software libre contiene los siguientes módulos: Cinemática de partículas en 2D, Cinemática circular de partículas en 2D, Estática de partículas en 2D, Estática de cuerpos rígidos en 2D, Dinámica de partículas en 2D, Dinámica circular de partículas en 2D, Calorimetría, gases ideales y dilatación. Esta aplicación solo presenta los resultados de los problemas.

Interactive Physics es un software de ordenador que permite modelar, simular y explorar una amplia variedad de fenómenos físicos y crear una gran cantidad de experimentos [Interactive Physics, 2018]. Este software permite entre otras cosas: crear objetos dibujando círculos, bloques y polígonos; simular contacto, colisiones y fricción; ver resultados como números, gráficas y vectores animados; medir velocidad, aceleración, fuerza, energía, etc. Por su parte, Staticus2d es una aplicación para dispositivo móvil que permite hallar dos fuerzas desconocidas P y Q cuando un cuerpo sometido a fuerzas concurrentes está en equilibrio. Otra aplicación para móviles es Dinámica del plano inclinado, la cual calcula numéricamente y representa vectorialmente las principales variables que intervienen en los problemas de Dinámica del plano inclinado. Esta aplicación ofrece una pantalla con la resolución detallada, los cálculos intermedios y la representación vectorial de todas las fuerzas que intervienen en el problema.

La solución presentada en este trabajo de investigación de un software de simulación para solución de problemas de condiciones de equilibrio ofrece ventajas puntuales sobre los softwares mencionados líneas arriba. Las ventajas estriban principalmente en que además de arrojar el resultado, ofrece una solución paso a paso de los problemas más comunes de cuerpos en equilibrio traslacional y rotacional y no solo un caso específico. Se ofrece el diagrama de cuerpo libre con todas las fuerzas que actúan y su descomposición en componentes. Lo anterior permite que el estudiante utilice el simulador para incentivar un aprendizaje significativo que lo conduzca a la creación de estructuras de conocimiento mediante la relación sustantiva entre la nueva información y sus ideas previas [Díaz, 2002].

## **2. Métodos**

La investigación se basó en una combinación de los modelos cuantitativo y cualitativo conocida como paradigma mixto. El enfoque mixto implica un proceso de recolección, análisis y vinculación de datos cuantitativos y cualitativos en un mismo estudio o una serie de investigaciones para responder al planteamiento del problema [Hernández, 2006].

Los hechos cuantificables en la investigación fueron los exámenes para medir el impacto del software de simulación para el aprendizaje de las condiciones de equilibrio. También, se recopiló información cualitativa como el contexto en que se desarrollan las cátedras, las experiencias previas de los estudiantes en otras materias, y su actitud frente a las cosas o conocimientos en base al significado que tiene para ellos.

Las variables presentes en el trabajo de investigación son:

- **Variable independiente.** Software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio.
- **Variable dependiente.** Aprendizaje del estudiante.

### **Ciclo de vida**

Para el desarrollo del software se utilizó el ciclo de vida iterativo, ya que este ciclo conlleva el refinamiento sucesivo de una arquitectura orientada a objetos por el cual se aplica la experiencia y resultados de cada versión a la siguiente iteración del análisis y diseño [Booch, 1998]. En la figura 1 se muestra el ciclo de vida iterativo.

### **Identificación de la necesidad del software de simulación**

Para identificar la necesidad del software de simulación, se aplicó un cuestionario de preguntas cerradas a estudiantes de tercer semestre de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Por otro lado, se obtuvieron estadísticas sobre índices de reprobación de la materia de Física en temas de condiciones de equilibrio desde el 2012 y hasta la fecha de realización de esta investigación en el mencionado instituto y carrera.

Los resultados de las preguntas más relevantes del cuestionario y los índices de reprobación se observan en la figura 2.

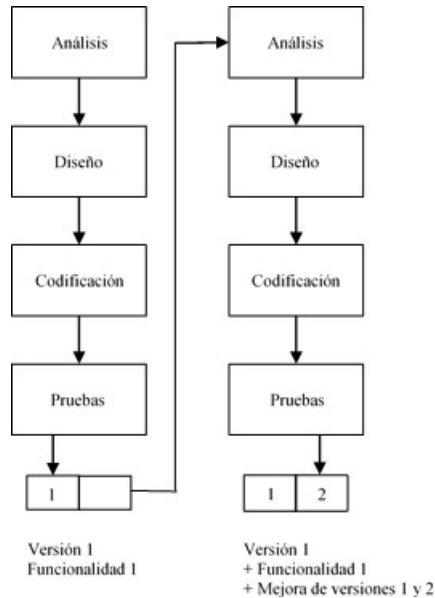


Figura 1 Ciclo de vida.

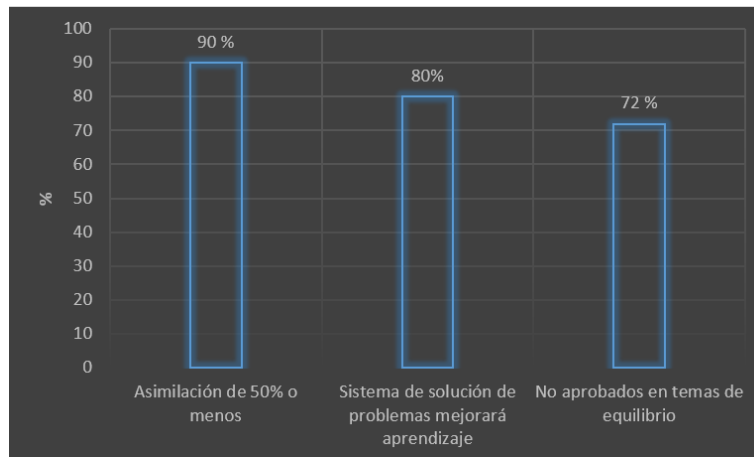


Figura 2 Identificación de las necesidades del sistema.

Estos resultados muestran que el 90% de los estudiantes a quienes se aplicó el cuestionario, refirieron que asimilaban 50% o menos de los temas de cuerpos en equilibrio. A pregunta expresa sobre si consideraban que un software de simulación para resolver ejercicios de cuerpos en equilibrio ayudaría a mejorar su aprendizaje sobre los temas, el 80% contestó de forma afirmativa. Por último, se

muestra también en la figura 2 que el 72% de los estudiantes reprobaron los temas de condiciones de equilibrio.

Por la información presentada en esta sección es que se decidió desarrollar el software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio.

### **Requerimientos de desarrollo del simulador**

Para el desarrollo del simulador se llevó a cabo un análisis de requerimientos, el cual da como resultado la especificación de las características operativas del software, indica la interfaz y otros elementos del sistema [Pressman, 2010]. Dentro de los requerimientos funcionales se estableció que el programa debía realizar los cálculos de los problemas más comunes de cuerpos en equilibrio, mostrando los resultados paso a paso junto con los diagramas de cuerpo libre con descomposición vectorial para que el usuario pudiera tener una mejor comprensión del problema. Respecto a los requerimientos no funcionales se tuvo que el simulador sería desarrollado en el lenguaje de programación C# en el Framework 4.5 con la IDE "Visual Studio". Para que el software pueda correr, el equipo de cómputo debe tener las siguientes características mínimas: procesador 1.4 GHz, 512 MB RAM, 1 GB de espacio en disco duro.

### **Casos de uso**

Respecto a los casos de uso, los cuales narran una historia estilizada sobre como interactúa un usuario final (que tiene cierto número de roles posible) con el sistema en circunstancias específicas [Pressman, 2010], se consideraron cuatro: iniciar software, seleccionar problema, insertar datos del problema y cerrar software. En la tabla 1 se muestran los eventos del caso de uso de insertar datos del problema.

### **Elementos y funciones para el desarrollo**

Para el desarrollo del simulador se utilizó el IDE Visual Studio, el cual es el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) de Microsoft para crear, ejecutar y depurar programas escritos en una variedad de lenguajes de programación .NET [Deitel,

Deitel, 2007]. Se utilizaron diferentes librerías y ensamblados externos al lenguaje C# los cuales se describen a continuación:

- **System.Drawing.Graphics.** La clase Graphics proporciona métodos para dibujar objetos en la pantalla. Se pueden dibujar muchas formas y líneas diferentes utilizando un objeto Graphics. Estos métodos incluyen DrawLine, DrawArc, DrawClosedCurve, DrawPolygon, y DrawRectangle. También puede dibujar imágenes e iconos utilizando la función DrawImage y DrawIcon, respectivamente. Además, puede manipular el sistema de coordenadas.
- **Ensamblado de Microsoft.VisualBasic.** Se utilizó esta librería ya que para el desarrollo del proyecto se necesitaron controles que C# no tiene por defecto.

Tabla 1 Insertar datos del problema.

Caso de uso:		Insertar datos del problema	
Actores:		Usuario, Alumno, Maestro.	
Descripción:		Insertar los datos para resolver un problema en específico.	
Precondición:		Un problema de condición de equilibrio debe estar seleccionado.	
Curso Normal			
Eventos usuarios		Eventos Sistema	
		1	El software muestra la interfaz del problema seleccionado.
2	El usuario inserta los datos en la sección de entradas.		
3	El usuario presiona el botón de resolver.		
		4	El software muestra el procedimiento de solución paso a paso en el apartado de resultados.
Cursos alternos			
		5	Si los datos son ingresados incorrectos el programa muestra un mensaje de error.
		5.1	Si los datos ingresados generan desbordamiento, esa parte del programa se cerrará automáticamente.
Postcondición		El sistema está listo para seleccionar un nuevo tipo de problema o salir.	

## Desarrollo del software de simulación

Debido a que los usuarios comprenden una aplicación al visualizar su interfaz gráfica de usuario (GUI) [Braude, 2003], en el software de simulación la interfaz para todos los casos de cuerpos en equilibrio está formada del mismo número de controles. Dicha interfaz tiene dos secciones de dibujo, una de ellas muestra la figura generada al ingresar los datos, dibujando sobre un sistema de ejes coordenados los vectores ingresados, mientras que la otra muestra el diagrama de cuerpo libre con la correspondiente descomposición de vectores. Contiene también una sección donde el usuario ingresa los datos del problema y finalmente una que muestra el desarrollo del problema paso a paso. Lo anterior se puede apreciar en la figura 3.

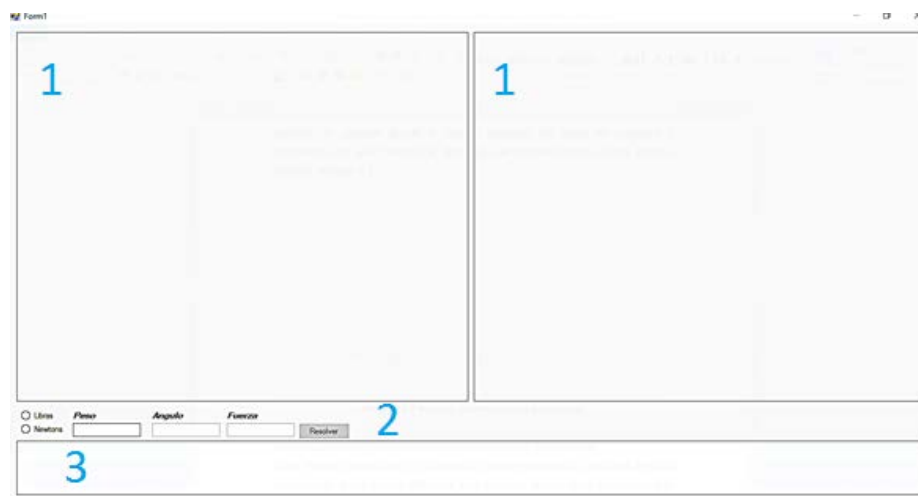


Figura 3 Interfaz general del simulador.

Para desarrollar el proyecto se utilizaron 2 clases, las cuales describen un grupo de objetos con estructura y comportamiento común [Weitzenfeld, 2005]. Las clases fueron llamadas “Dibujo” y “Cálculo”. La clase Dibujo se encarga de trazar el gráfico que se forma a partir de los datos de entrada, así como el diagrama de cuerpo libre. En la figura 4 se muestra parte del código de esta clase.

En la clase Cálculo se realizan los diferentes cálculos para llegar a la solución, mostrando el proceso paso a paso en el control de resultados. En la figura 5 se muestra parte del código de esta clase.

```

miDibujo.DrawLine[cuadro, 0, i, miMapa.Width, i];
}

Random rdn = new Random();

for (int i = 0; i < contDatos; i++)
{
double Angulo = (DatosCos[i, 0] * Math.PI) / 180 * -1; //Radianes
//double py = ((radio) * Math.Sin(Angulo en radianes) + (origen));

double px = ((this.Objpic.Width) * Math.Cos(Angulo) + (this.Objpic.Width / 2));
double py = ((this.Objpic.Height) * Math.Sin(Angulo) + (this.Objpic.Height / 2));

int r = rdn.Next(1, 1);
int g = rdn.Next(100, 200);
int b = rdn.Next(150, 230);

Pen lapiz = new Pen(Color.FromArgb(r, g, b), 1);
/*lapiz.StartCap = LineCap.ArrowAnchor; Fechas ->
lapiz.EndCap = LineCap.ArrowAnchor;*/
miDibujo.DrawLine(lapiz, this.Objpic.Width / 2, this.Objpic.Height / 2, (int)px, (int)py);
Brush letra = new SolidBrush(Color.FromArgb(0, 0, 0));
px = ((this.Objpic.Width / 4) * Math.Cos(Angulo) + (this.Objpic.Width / 2));
py = ((this.Objpic.Height / 4) * Math.Sin(Angulo) + (this.Objpic.Height / 2));
miDibujo.DrawString(DatosCos[i, 0].ToString() + "°", myFont, letra, (int)px, (int)py);

}
for (int i = 0; i < 2; i++)
{
double Angulo = (Variable[i] * Math.PI) / 180 * -1; //Radianes

```

Figura 4 Parte del código de la clase dibujo.

```

{
signo[i, 0] = "+"; //Coseno
signo[i, 1] = "+"; //Seno
ecuacion1 += signo[i, 0] + nomvar[i] + Unidad + "Cos " + Variable[i];
ecuacion2 += signo[i, 1] + nomvar[i] + Unidad + "Sen " + Variable[i];

}
if (Variable[i] > 90 && Variable[i] <= 180)
{
Variable[i] = 180 - Variable[i];

signo[i, 0] = "-"; //Coseno
signo[i, 1] = "+"; //Seno
ecuacion1 += signo[i, 0] + nomvar[i] + Unidad + "Cos " + Variable[i];
ecuacion2 += signo[i, 1] + nomvar[i] + Unidad + "Sen " + Variable[i];
}
else if (Variable[i] > 180 && Variable[i] <= 270)
{
Variable[i] = 270 - Variable[i];
signo[i, 0] = "-"; //Coseno
signo[i, 1] = "-"; //Seno
ecuacion1 += signo[i, 0] + nomvar[i] + Unidad + "Cos " + Variable[i];
ecuacion2 += signo[i, 1] + nomvar[i] + Unidad + "Sen " + Variable[i];
}
else if (Variable[i] > 270 && Variable[i] <= 360)
{
Variable[i] = 360 - Variable[i];
signo[i, 0] = "+"; //Coseno
signo[i, 1] = "-"; //Seno
ecuacion1 += signo[i, 0] + nomvar[i] + Unidad + "Cos " + Variable[i];

```

Figura 5 Parte del código de la clase Cálculo.

### 3. Resultados

Una vez terminado el software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio, se procedió a probar su eficacia en dos grupos de la



materia de Física de la carrera de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Se aplicaron los exámenes escritos correspondientes a los temas de cuerpos en equilibrio del semestre. Posteriormente, se facilitó el software a los estudiantes para que lo utilizaran y se aplicaron nuevos exámenes escritos. Los resultados de ambas evaluaciones, la preliminar y la posterior al uso del sistema, se muestran en la figura 6. Se puede observar una mejora significativa en los índices de aprobación relacionados directamente con la variable dependiente de la investigación: el aprendizaje de los estudiantes. Los exámenes escritos aplicados sin utilizar el simulador arrojaron un 78% de reprobación, mientras que después de utilizar el software de simulación se obtuvo un porcentaje de reprobación de 38%.

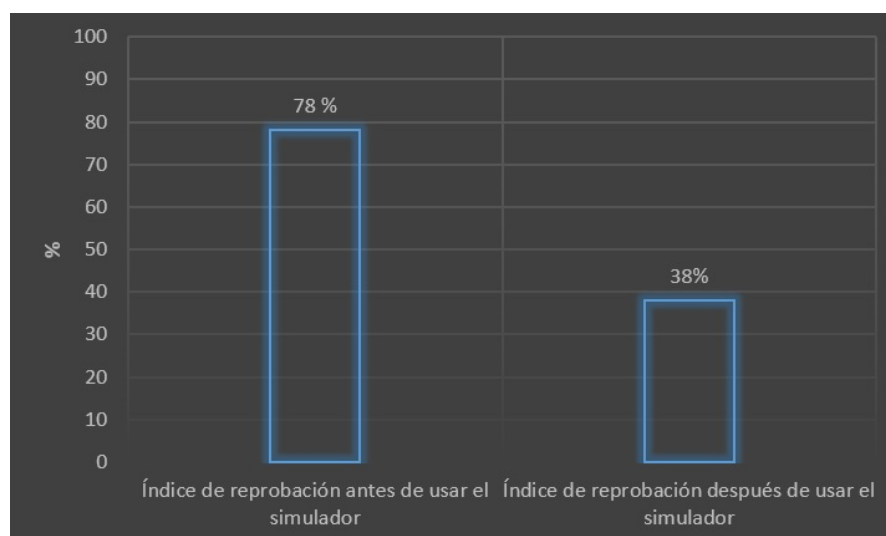


Figura 6 Resultados del examen escrito antes y después del uso del sistema.

Por otro lado, se aplicó una encuesta de satisfacción a los estudiantes después de utilizar el software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio, cuyos resultados se muestran en la figura 7.

Los números arrojados por el instrumento muestran que la satisfacción en términos generales fue bastante alta, ya que el 98% de los encuestados consideró que el software les ayudó en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio y, para quienes lo lograron, en la aprobación de la evaluación respectiva. Además, el

software satisfizo a los estudiantes en los apartados de diseño de la interfaz gráfica y usabilidad como lo muestran los resultados del 90% y 95% respectivamente. El 80% consideró que cada caso de las condiciones de equilibrio presentado en el software estuvo suficientemente descrito.

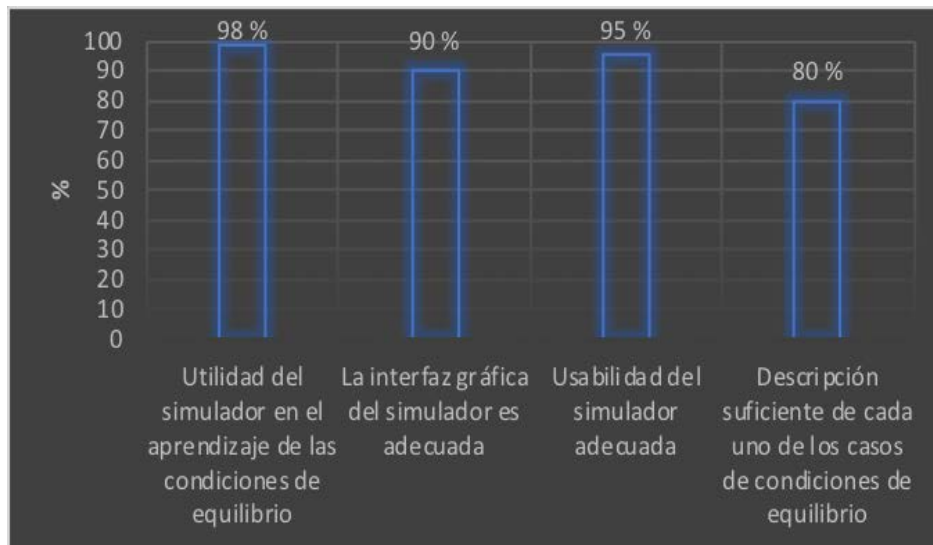


Figura 7 Resultados de la encuesta de satisfacción después del uso del sistema.

En la encuesta se incluyó una pregunta acerca de las mejoras que los estudiantes sugerían al software. Las respuestas más recurrentes indicaron que el software contara con una sección que presentara información teórica sobre las condiciones de equilibrio, una sección de autoevaluación y que se cubrieran las condiciones de equilibrio en tres dimensiones. Lo anterior dio pie a la identificación de mejoras a introducir en versiones futuras del software.

### Software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio

La interfaz del software de simulación cuenta de inicio con una pantalla que muestra los 10 casos diferentes de problemas de cuerpos en equilibrio que se pueden resolver, como se muestra en la figura 8. Cabe mencionar que los primeros 7 se refieren a equilibrio traslacional, mientras que los últimos tres se refieren a equilibrio traslacional y rotacional.

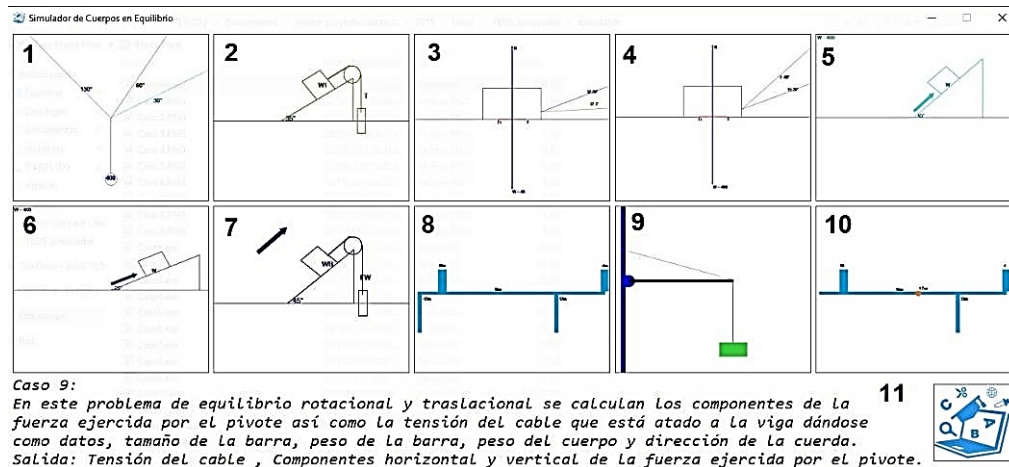


Figura 8 Interfaz del simulador para solución de cuerpos en equilibrio.

En el caso 1 se resuelven las tensiones de las cuerdas que sostienen un cuerpo. El caso 2 calcula la fuerza paralela al plano inclinado debida a la interacción de dos cuerpos. El caso 3 calcula los coeficientes de fricción cinética y estática por el movimiento de un cuerpo. El caso 4 calcula la fuerza que se requiere para arrastrar un cuerpo. El caso 5 calcula la fuerza paralela al plano para que un cuerpo se mueva hacia arriba o hacia abajo con velocidad constante. El caso 6 calcula si un cuerpo está en equilibrio o no. El caso 7 calcula la fuerza de fricción en un plano inclinado y la dirección del movimiento. El caso 8 calcula las fuerzas de reacción ejercidas por los soportes sobre una barra. El caso 9 calcula las componentes de una fuerza ejercida por un pivote y la tensión en una cuerda. El caso 10 calcula el momento de torsión resultante respecto a un punto. La sección 11 de la interfaz muestra una breve descripción de lo que se calcula en cada caso, así como los datos que se ingresan y los resultados arrojados. En la figura 8 se observa que se encuentra seleccionado el caso 9. Para mostrar el contenido de la sección 11 basta con colocar el puntero del mouse sobre el caso correspondiente.

A continuación, se detalla el funcionamiento del simulador tomando un problema del caso 5, el cual se selecciona haciendo clic con el mouse sobre su sección en la pantalla principal. En la figura 9 se muestra como después de ingresar los datos se crea el diagrama de cuerpo libre con la descomposición vectorial en componentes cuando el cuerpo sube.

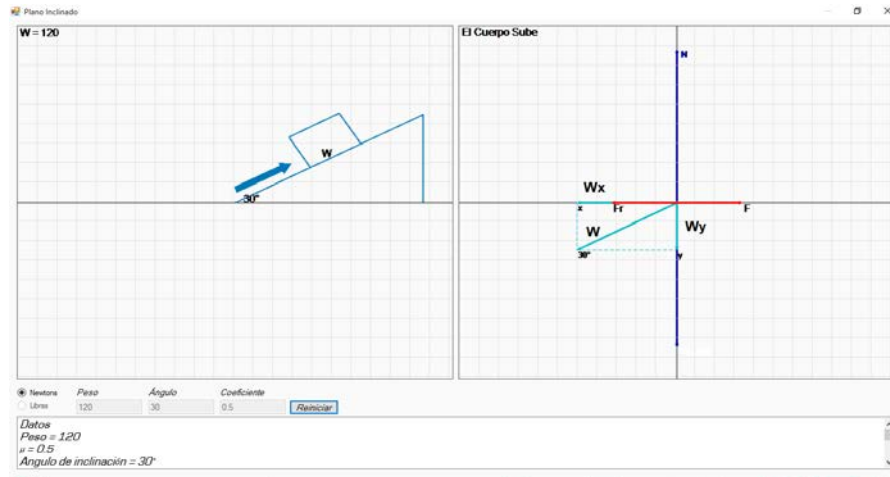


Figura 9 Diagrama de cuerpo libre cuando el cuerpo sube.

Para mostrar el diagrama de cuerpo libre cuando el cuerpo baja como se observa en la figura 10, basta con hacer doble clic en la sección de diagrama de cuerpo libre de la interfaz. Es importante hacer notar que en la sección de datos podemos elegir entre Newtons o Libras para el peso, y que una vez resuelto el problema podemos reiniciar con otro problema diferente.

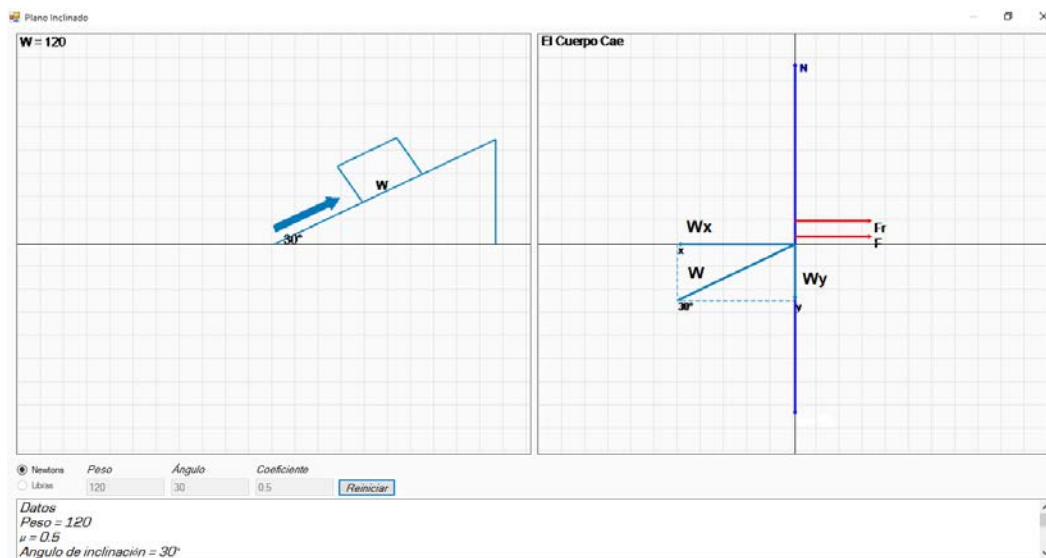


Figura 10 Diagrama de cuerpo libre cuando el cuerpo cae.

Por último, para observar el proceso de solución paso a paso se procede a un desplazamiento con la barra correspondiente en el panel de resultados, o bien, se

puede hacer doble clic en el mencionado panel para ampliar la pantalla, como se observa en la figura 11. Para regresar a la vista anterior basta hacer doble clic en la pantalla extendida.

```

Piano Inclinado
Datos
Peso = 120
μ = 0.5
Angulo de inclinación = 30°
Nota
μs = Coeficiente de rozamiento estatico
μk = Coeficiente de rozamiento dinamico
Fr = Fuerza de rozamiento
Frs = μsN
Frk = μkN
∑Fy = 0
N - Wcosθ = 0
N - 120Ncos30 = 0
N + [-103.923048454133N] = 0
N = 103.923048454133N
Fuerza con velocidad hacia arriba
∑Fx = 0
F - Fr - Wx = 0
Fk = μkN
F - μkN - Wx = 0
F = μkN + Wx
F = 0.5N(103.923048454133N) + 120Nsen30
F = 111.961524227066N

Fuerza con velocidad hacia abajo
∑Fx = 0
F + Fr - Wx = 0
F = Wx - Fr
F = 120Nsen30 + [-0.5N](103.923048454133N)
F = 0.03847577293367N
    
```

Figura 11 Solución paso a paso pantalla extendida.

### Manual de usuario

El software de simulación se acompaña de un manual de usuario, el cual incluye las instrucciones para el manejo del software. En la figura 12 se muestra un extracto de dicho manual donde se explica cómo ingresar los datos cuando se selecciona un problema correspondiente al caso 1 donde se calculan las tensiones de las cuerdas que sostienen a un cuerpo.

Como existen dos incógnitas en este ejemplo se inserta el valor de cada una, y en el campo "Fuerza" se inserta T1 y T2, insertamos el valor presionando enter en el campo de la fuerza.

Ángulo	Fuerza
<input type="text" value="20"/>	<input type="text" value="t1"/>

Ángulo	Fuerza
<input type="text" value="120"/>	<input type="text" value="t2"/>

Si existiese una tercera cuerda se tendría que insertar forzosamente el valor de la fuerza aplicada a la cuerda. Ejemplo:

Ángulo	Fuerza
<input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="23"/>

Figura 12 Extracto del manual de usuario.

## **4. Discusión**

Las ciencias duras tales como la Física, han significado un dolor de cabeza para los diferentes actores que participan en el proceso de enseñanza aprendizaje, díganse el estudiante, el profesor y las instituciones educativas. Para el estudiante significa atrasarse en sus planes de estudio al no aprobar la materia, y en algunos casos extremos es causa de su deserción de la institución. El profesor, por su parte, se enfrenta a la búsqueda incesante de nuevas estrategias que le permitan impactar eficazmente en el aprendizaje de los estudiantes, buscando subsanar las deficiencias que arrastra de niveles de estudio anteriores. Las instituciones, por otro lado, buscan aumentar sus índices de egreso, egresados que lleven una sólida preparación que les permita enfrentarse al mercado laboral de forma competitiva. En este orden de ideas, el uso de herramientas de software que faciliten el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería complementa efectivamente lo aprendido en las asignaturas del plan de estudio que cursan. Si el estudiante tiene a su disposición los medios que le permitan no solo comprobar resultados, sino que le muestren el proceso completo de solución de los problemas, entonces contará con uno de los elementos que lo llevan a aprobar las materias no solo por productos sino, y, sobre todo, por un aprendizaje significativo.

Por otro lado, la encuesta de satisfacción que se aplicó a los estudiantes en este trabajo de investigación arrojó como áreas de oportunidad del software la ausencia de información teórica sobre los temas que trata y una sección de autoevaluación. De tal manera que un software de simulación que incluya estos elementos, además de la solución paso a paso, puede convertirse no solo en una herramienta que complemente el aprendizaje que los estudiantes adquieren en las aulas, sino en una que permita el autoaprendizaje sin la necesidad imperiosa de un profesor.

## **5. Conclusiones**

En el presente trabajo se generó un software de simulación centrado en el aprendizaje de las condiciones de equilibrio. Este simulador permite resolver diez casos diferentes de problemas que implican equilibrio traslacional y rotacional. En el caso 1 se resuelven las tensiones de las cuerdas que sostienen un cuerpo. El

caso 2 calcula la fuerza paralela al plano inclinado debida a la interacción de dos cuerpos. El caso 3 calcula los coeficientes de fricción cinética y estática por el movimiento de un cuerpo. El caso 4 calcula a fuerza que se requiere para arrastrar un cuerpo. El caso 5 calcula la fuerza paralela al plano para que un cuerpo se mueva hacia arriba o hacia abajo con velocidad constante. El caso 6 calcula si un cuerpo está en equilibrio o no. El caso 7 calcula la fuerza de fricción en un plano inclinado y la dirección del movimiento. El caso 8 calcula las fuerzas de reacción ejercidas por los soportes sobre una barra. El caso 9 calcula las componentes de una fuerza ejercida por un pivote y la tensión en una cuerda. El caso 10 calcula el momento de torsión resultante respecto a un punto.

El simulador permite observar la solución completa de los problemas paso a paso, mostrando los diagramas de cuerpo libre con la descomposición vectorial en componentes. Además, se incluye un manual de usuario que explica detalladamente el funcionamiento del simulador.

Con el presente trabajo se pretende que los estudiantes de Física de las carreras de Ingeniería impartida en los Institutos Tecnológicos del país, y en general cualquier estudiante interesado en el tema, puedan complementar su aprendizaje sobre condiciones de equilibrio. Se pretende que lo anterior incida positivamente en los índices de aprobación por aprendizaje significativo de la materia de Física. Por otro lado, se prevé a futuro complementar el trabajo integrando la solución de problemas de cuerpos en equilibrio en tres dimensiones, información teórica sobre condiciones de equilibrio y una sección de autoevaluación. Lo anterior permitirá una mayor versatilidad con fines didácticos, ya que el estudiante contará con una sola herramienta que le ofrezca la ayuda completa en los temas de equilibrio de la materia de Física.

Por último, los resultados obtenidos al utilizar el simulador muestran una mejoría significativa en la asimilación, comprensión y aplicación de conceptos relacionados con condiciones de equilibrio en la solución de problemas. De tal manera que se comprobó la utilidad de las herramientas didácticas de software en el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Booch G., Análisis y Diseño Orientado a Objetos con Aplicaciones, Pearson Educación, Segunda Edición, 1998, 265, 266 pp.
- [2] Braude E., Ingeniería de Software, una perspectiva orientada a objetos, Alfaomega, 2003, 151 p.
- [3] Cabero-Almenara, J., Costas J., La utilización de simuladores para la formación de los alumnos. Prisma Social 2016: <<http://ucsj.redalyc.org/articulo.oa?id=353749552015>> ISSN, 6 p.
- [4] Deitel H., Deitel P, Como programar C#, Pearson, Segunda Edición, 2007, 18 p.
- [5] Díaz F., Hernández G., Estrategias Docentes para un Aprendizaje Significativo. Una Interpretación Constructivista, Mc Graw Hill, Segunda Edición, 2002, 39 p.
- [6] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. Metodología de la investigación, Mc-Graw Hill, 2006, 783 p.
- [7] Pressman R., Ingeniería del Software Un Enfoque Práctico, Mc Graw Hill, Séptima Edición, 2010, 127 p.
- [8] Weitzenfeld A., Ingeniería de Software Orientada a Objetos con uml, java e internet, Thomson, 2005, 72 p.
- [9] <https://www.gnu.org/software/fisicalab/index.es.html> junio de 2017.
- [10] <http://www.design-simulation.com/IP/Index.php> junio de 2017.



# **SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA SILLA/EXOESQUELETO**

## *SIMULATION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A CHAIR/EXOSKELETON*

**Luis I. Solórzano Caballero**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
luisiransc@gmail.com

**Amparo D. Palomino Merino**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
palomino@ece.buap.mx

**Fernando Reyes Cortés**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
fernando.reyes@correo.buap.mx

**César Martínez Torres**

Universidad de las Américas Puebla  
cesar.martinez@udlap.mx

**Rogelio Pérez Santiago**

Universidad de las Américas Puebla  
rogelio.perez@udlap.mx

**Gibran Etcheverry**

Universidad de las Américas Puebla  
gibran.etccheverry@udlap.mx

## **Resumen**

Esta investigación evalúa el diseño mecánico de un exoesqueleto de tipo pasivo para extremidades inferiores del cuerpo comúnmente denominado “chairless-chair” cuyo objetivo es disminuir el cansancio físico y las lesiones musculoesqueléticas en áreas laborales. Mediante simulaciones se realizó un análisis estructural y de pandeo con el propósito de examinar los componentes del mecanismo los cuales soportan y transmiten el peso del usuario hacia el piso, para establecer bajo qué condiciones de carga la silla/exoesqueleto cumple con los requisitos de resistencia. Asimismo, se analizó el comportamiento estructural de la

silla/exoesqueleto considerando que para su fabricación se utilizan tres materiales distintos al aluminio (acero, plástico ABS, y polímero reforzado con fibra de carbono); los resultados demuestran que el aluminio es el material más adecuado porque presenta un equilibrio entre ligereza, rigidez, aspectos económicos, y resistencia a fallar por pandeo; además, soporta eficientemente al usuario estándar cuando este está sentado sobre la silla/exoesqueleto.

**Palabras Claves:** Análisis estructural, análisis de pandeo, silla/exoesqueleto.

## **Abstract**

*This research evaluates the mechanical design of a passive lower extremities exoskeleton commonly called “chairless-chair”, which objective is to decrease physical fatigue and skeletal-muscle injuries mainly in labor areas. Through simulations a structural and a buckling analysis were made with the purpose of examine the components of the mechanism which support and transmit the user’s weight to the floor in order to establish under what load conditions the exoskeleton/chair meets the resistance requirements. Besides this, the structural behavior of the exoskeleton/chair was analyzed considering that for its manufacturing three materials other than aluminum were used (steel, ABS plastic, and carbon fiber reinforced polymer); the results show that aluminum is the most suitable material since it presents a balance between lightness, rigidity, economical aspects, and resistance to a buckling failure; in addition, it efficiently supports to the standard user when this is sitting on the exoskeleton/chair.*

**Keywords:** Structural analysis, buckling analysis, exoskeleton/chair.

## **1. Introducción**

Los exoesqueletos son sistemas mecatrónicos sofisticados cuya finalidad es la de satisfacer una necesidad biológica motriz en una persona. El soporte proporcionado por los exoesqueletos es externo al cuerpo por lo cual estos sistemas son acoplados a las extremidades corporales como un elemento adicional no invasivo que, como en la mayoría de los casos para su implementación sólo se requiere ajustarlo como un elemento más añadido a la

vestimenta que las personas utilizan cotidianamente. La palabra que le da el nombre a los exoesqueletos ('exo' significa exterior, y esqueleto; esqueleto externo), proporciona una definición meramente introductoria de lo que son estos sistemas ya que actualmente se han desarrollado exoesqueletos muy complejos para los cuales es necesario hacer más explícita la categoría a la cual pertenece y los rasgos principales que dicho exoesqueleto tiene. Actualmente se categorizan en base a sus aspectos estructurales, de funcionamiento, área de aplicación, entre otros. Abordando la categoría por área de aplicación, algunos de sus campos son rehabilitación y asistencia, ámbito militar, y área laboral e industrial. En el campo de la rehabilitación y asistencia, exoesqueletos como los reportados en [López, 2014], [Sanz-Merodio, 2013], se enfocan en crear sistemas que les permitan a las personas con discapacidades parciales o totales de sus extremidades inferiores y/o superiores recuperar parte de la fuerza y movilidad, o proveer de completa movilidad a tales partes del cuerpo. Estos exoesqueletos son en su mayoría de tipo activo, lo cual indica que aumentan la fuerza del segmento del cuerpo en el cual está siendo utilizado. Por otra parte, en el ámbito militar se desarrollan exoesqueletos comúnmente activos para miembros tanto superiores como inferiores del cuerpo que les permitan a los usuarios transportar cargas significativas con el mínimo esfuerzo por periodos prolongados de tiempo [Zoss, 2005]. De manera similar, en el campo laboral e industrial diversas corporaciones han desarrollado exoesqueletos que tienen como principal objetivo reducir las lesiones musculo-esqueléticas ocasionadas por fatiga [Lockheed, 2018], [US Bionics Inc., 2018]. Estos exoesqueletos pueden ser activos o pasivos; los pasivos son aquellos que no aumentan la fuerza de los trabajadores, sino que actúan de manera indirecta mediante mecanismos que desvían la carga del peso del usuario de los músculos y articulaciones de sus extremidades para permitirle adoptar posiciones corporales saludables al realizar una labor.

El exoesqueleto al cual está dirigida esta investigación es el que se muestra en la figura 1; es para extremidades inferiores del cuerpo, de tipo pasivo:

- a) Fase inicial, el usuario está de pie.
- b) Fase intermedia, la rótula inferior hace contacto con el piso.

c) Fase final, el usuario está sentado sobre la silla/exoesqueleto.

Su principal área de aplicación es el campo laboral e industrial debido a que gran parte de estos trabajadores (por ejemplo, trabajadores en líneas de producción y ensamblaje de productos), realizan tareas repetitivas en espacios de trabajo reducidos mientras están parados durante jornadas laborales completas, además de que colocar sillas en esas áreas no es factible. A este tipo de exoesqueletos se le denomina “chairless-chair”, ya que el mecanismo que lo compone funciona como una silla replegable que se despliega cuando el usuario flexiona las articulaciones de sus piernas para adoptar una posición inclinada al realizar algún trabajo o actividad. La silla/exoesqueleto se fija a las piernas del usuario, y debido a que sus articulaciones no son actuadas el movimiento que dirige sus desplazamientos es el transmitido por las piernas del usuario.

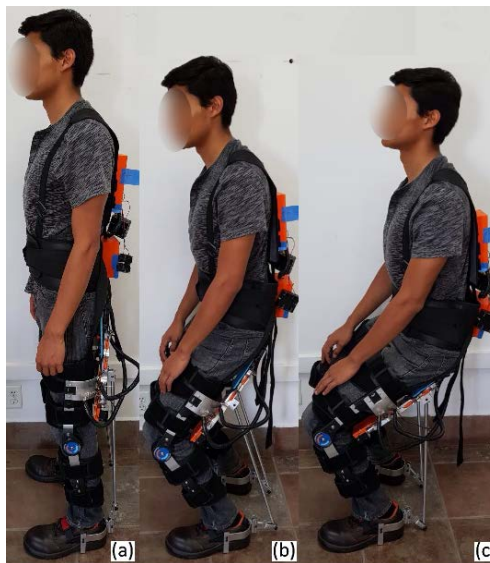


Figura 1 Fases de accionamiento de la silla/exoesqueleto.

Exoesqueletos con características similares a la silla/exoesqueleto que se presenta en esta investigación se encuentran en una etapa de comercialización [Noonee, 2018], [NITTO Co., 2015], existe poca información acerca de estos en revistas y artículos de divulgación. Por otra parte, prototipos de silla/exoesqueletos de bajo costo han sido presentados en [Zurina, 2015], [Suhail., 2008], en los cuales existen

deficiencias de diseño considerando su área de aplicación, ya que el material con el cual están fabricados es acero, por lo cual el peso de la silla/exoesqueleto es inapropiado; la descarga del peso del usuario por medio de la silla/exoesqueleto no es directamente al suelo, sino que descarga en su pantorrilla o en sus talones; además, el mecanismo con el cual se bloquea la silla/exoesqueleto para que el usuario pueda sentarse sobre la misma puede obstruir el espacio de trabajo debido a sus dimensiones. Así, la silla/exoesqueleto que se presenta en este artículo representa un diseño innovador ya que sus componentes están fabricados de aluminio lo cual la hace ligera y de bajo costo; descarga el peso del usuario directamente al suelo, además de que el mecanismo de bloqueo y descarga de la silla/exoesqueleto se repliega hacia las piernas del usuario cuando este se pone de pie. En consecuencia, evaluar el diseño considerando los materiales de fabricación, así como el mecanismo propuesto de bloqueo y descarga resulta vital para valorar su eficiencia; para este propósito se deben considerar las herramientas teóricas adecuadas con respecto a la mecánica de los materiales, e interpretar apropiadamente los resultados obtenidos por medio de simulaciones.

### **Diseño mecánico de la silla/exoesqueleto**

El mecanismo del exoesqueleto está compuesto por 22 partes diferentes hechas de aluminio, acopladas por medio de 3 articulaciones rotacionales y 1 articulación de tipo traslacional. La parte inferior del exoesqueleto se ajusta firmemente a las botas del usuario, y la parte superior del exoesqueleto es ajustada a las piernas, la cadera, y los hombros del usuario a través de cintas adheribles de tela reforzada parecidas a las de una órtesis. El exoesqueleto está compuesto por 2 mecanismos similares, cada uno de estos es ajustado a cada una de las piernas del usuario. En la figura 2 se muestran los componentes principales del exoesqueleto (sin considerar las cintas adheribles), los cuales han sido enumerados con el propósito de identificarlos como piezas individuales: 1. base inferior, 2. base lateral, 3. unión de la base y la horquilla, 4. horquilla, 5. rótula inferior, 6. barra de soporte, 7. rótula superior, 8. corredera, 9. bloqueador, 10. base de la corredera, y 11. resorte. Las articulaciones rotacionales son las partes 3, 5 y 7; y la articulación lineal es la parte

8. Ninguna de las articulaciones es actuada por un motor, y las piezas están mecánicamente acopladas.

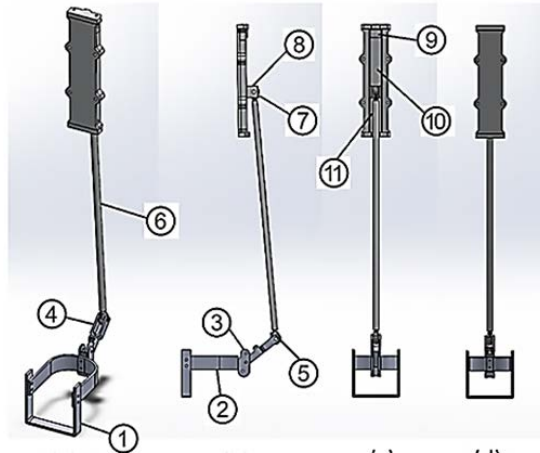


Figura 2 Componentes de la silla/exoesqueleto.

### **Análisis de resistencia del mecanismo**

Utilizando el software de análisis de elemento finito llamado Nastran In-CAD (ambiente de simulación del software Autodesk Inventor 2018), se realizaron dos tipos de análisis a los componentes mecánicos que tienen mayor incidencia en la carga y descarga del peso del usuario. El primer análisis es estructural estático y examina la última fase de operación de la silla/exoesqueleto (ver figura 1), es decir, cuando esta está totalmente desplegada y a su vez el usuario posa su cuerpo a manera de descanso sobre la misma. Bajo estas consideraciones un vector de fuerza que ha sido determinado previamente y que representa el peso del usuario actuando en tal dirección, es aplicado sobre las superficies de los componentes mecánicos que reciben y transmiten dicha carga. Posteriormente, se determina el esfuerzo máximo al cual las piezas de la silla/exoesqueleto están siendo sometidas. El segundo análisis es de pandeo, definido por [Gere et al., 2016] como una de las causas principales de fallas en estructuras que siempre debe ser considerada en el diseño. En este análisis es importante resaltar el hecho de que la silla/exoesqueleto cumple con dos definiciones: es un mecanismo durante el proceso de repliegue, y una estructura cuando el repliegue ha sido completado. Por tal motivo, el análisis de pandeo en la fase final de la silla/exoesqueleto en la

cual adopta su configuración de estructura es fundamental para conocer la carga crítica de pandeo.

## 2. Métodos

Con la finalidad de seleccionar un material que satisfaga los requerimientos técnicos para la fabricación y uso de la silla/exoesqueleto, se llevó a cabo el procedimiento que se muestra en la figura 3.

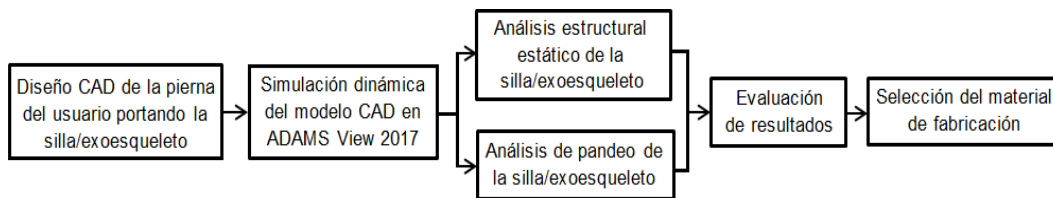


Figura 3 Metodología implementada para la solución del problema planteado.

La etapa inicial comienza con el diseño en un software CAD de un modelo 3D que represente al sistema completo, es decir, a la silla/exoesqueleto acoplada a una pierna del usuario. Al realizar el diseño es esencial considerar las dimensiones reales de cada elemento ya que posteriormente se utilizará este modelo para determinar los valores de masa y fuerza que se requieren en el proceso de solución del problema. A continuación, mediante el uso de ADAMS View 2017, un software con ambiente gráfico para simulación dinámica, y el uso del modelo de la pierna con la silla/exoesqueleto se determinan las fuerzas de carga que actúan sobre los principales elementos del mecanismo. En seguida, mediante la información adquirida previamente (la geometría de los segmentos y partes del modelo 3D, sus respectivas masas, y las fuerzas de carga), se realizó un estudio estático de resistencia utilizando el software de análisis de elemento finito Nastran In-CAD para conocer las condiciones estructurales de la silla/exoesqueleto en función de las propiedades mecánicas de cuatro materiales distintos.

### Modelo 3D de una pierna utilizando la silla/exoesqueleto

Con el propósito de disponer de un modelo que pueda ser utilizado como planta de estudio y simulación, se diseñó en un software CAD un modelo 3D de una de

las piernas del usuario. Sus dimensiones se obtuvieron mediante mediciones realizadas directamente sobre el usuario estándar de la silla/exoesqueleto, y para establecer la masa de los segmentos de la pierna se utilizaron tablas probabilísticas compuestas de información recopilada por diversos autores en el área de antropometría [Winter, 2009].

(Se ha optado por dibujar una sola pierna bajo la consideración de que el usuario tiene simetría en sus extremidades inferiores del cuerpo, lo cual simplifica el análisis de este sistema). Cabe destacar que el modelo de la figura 4 fue indispensable para obtener por medio de simulaciones las fuerzas de reacción que actúan sobre la silla/exoesqueleto; debido a que esta investigación se enfoca en el análisis estructural estático de la silla/exoesqueleto, la información de la dinámica de la pierna no se expone ampliamente.

En la figura 4 se muestra el modelo de la pierna el cual está compuesto de los siguientes segmentos: Pie, Pantorrilla, Muslo, y Parte superior del cuerpo soportada por una sola pierna (representa la mitad de la masa del tronco, de los brazos, y de la cabeza).

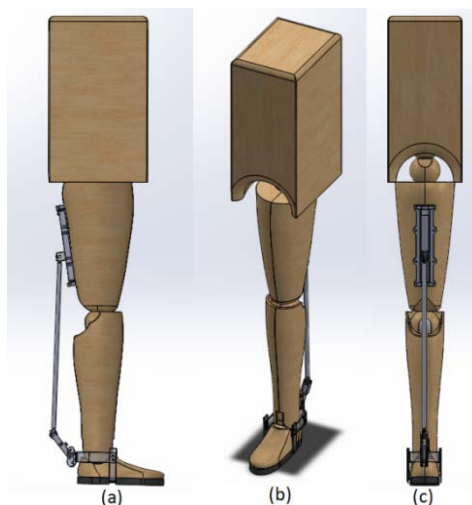


Figura 4 Modelo 3D sistema completo, pierna portando la silla/exoesqueleto.

Una consideración más en el diseño del modelo de la pierna es que sus segmentos son cuerpos rígidos. La pierna diseñada contiene tres articulaciones de tipo rotacional, las cuales están ubicadas en el tobillo, la rodilla, y la cadera. En la figura



4 también se puede observar el acoplamiento realizado mediante un ensamble en el software CAD del modelo de la pierna y el modelo de la silla/exoesqueleto. En la tabla 1 se muestran las masas de cada uno de los segmentos de la pierna del usuario estándar, una persona del sexo masculino de 24 años de edad, con una altura de 1.75 m y un peso de 65 kg; estos valores de masa fueron determinados utilizando una expresión para la densidad del cuerpo en función del peso y de la altura [Winter, 2009], así como el volumen que ocupa cada segmento de la pierna.

Tabla 1 Masa de los segmentos de una sola pierna del usuario.

Segmento	Masa (kg)
Pie	1.363
Pantorrilla	3.802
Muslo	8.556
Tronco/brazos/cabeza	18.776

### Simulación dinámica en ADAMS View 2017

Por medio del software ADAMS View se han determinado las fuerzas de contacto ocasionadas por la interacción entre los elementos mecánicos que se muestran en la figura 5. Estas interacciones forman parte del concepto de diseño estructural de la silla/exoesqueleto, ya que a través de estas los componentes del mecanismo logran inmobilizarse y permanecer en una configuración estructural capaz de soportar el peso del usuario.

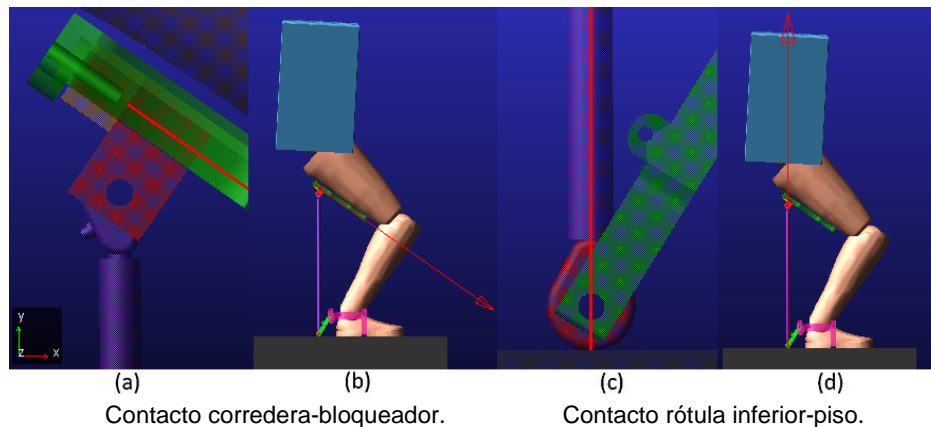


Figura 5 Fuerzas ocasionadas por la interacción entre las piezas de la silla/exoesqueleto.

Para que la silla/exoesqueleto sea desplegada se requiere que el mecanismo llegue a la segunda fase de accionamiento, es decir, el contacto entre la rótula inferior contra el piso (figura 5c); esto ocasiona que la pieza denominada corredera comience a desplazarse con una trayectoria recta hasta que toque con el bloqueador (figura 5a). Cuando esta última interacción sucede la silla/exoesqueleto está totalmente desplegada y pasa de ser mecanismo a estructura, la cual por definición no tiene partes móviles. Mientras tanto, estas piezas en contacto están mutuamente sometidas a esfuerzos de compresión. Las fuerzas resultantes de la interacción entre la corredera y el bloqueador, y las de la interacción entre la rótula inferior y el piso se muestran en las figuras 5b y 5d, respectivamente.

En la tabla 2 se muestran las magnitudes de los componentes de cada una de las fuerzas obtenidas mediante simulaciones. La tabla 2 señala que la fuerza resultante generada por la rótula inferior y el piso, tiene un único componente en dirección del eje Y+; este hecho es resultado del diseño estructural de la silla/exoesqueleto, ya que al quedar la barra de soporte posicionada verticalmente en la fase final la carga es transmitida uniformemente sobre su sección transversal evitando de esta manera que falle por flexión lateral. Por otro lado, la fuerza resultante del contacto entre la corredera y el bloqueador tiene tres componentes debido a la disposición final de ambas piezas al momento de su interacción.

Tabla 2 Fuerzas presentes en la fase final de la silla/exoesqueleto.

Componente de la fuerza	Contacto entre la corredera y el bloqueador (N)	Contacto entre la rótula inferior y el piso (N)
Fx	42.3763	0
Fy	-29.0053	-91.4364
Fz	-0.0743	0

### **Análisis estático de la silla/exoesqueleto**

Utilizando el software de análisis de elemento finito Nastran In-CAD se realizaron dos estudios a los componentes mecánicos de las figuras 5a y 5c, respectivamente, en la configuración final de la silla/exoesqueleto. El primer estudio es un análisis estructural estático y se enfoca en conocer el factor de

seguridad mínimo para identificar los valores de esfuerzos permisibles a los cuales pueden estar sometidos estos componentes. El factor de seguridad se define como una razón entre la resistencia real y la resistencia requerida [Gere, 2016]; por tal motivo, para constatar que la resistencia real de la estructura de la silla/exoesqueleto sea mayor que la resistencia requerida, mediante el uso de Nastran In-CAD se obtienen los valores de los esfuerzos causados por la carga del usuario en turno. Posteriormente, utilizando los coeficientes de esfuerzo de cedencia (tabla 3), se calcularon los factores de seguridad mínimos para cada una de las estructuras analizadas. (Los resultados del análisis estructural estático se muestran en la siguiente sección).

Tabla 3 Propiedades mecánicas de los materiales de interés.

Material	Densidad (ton/mm <sup>3</sup> )	Módulo de elasticidad (MPa)	Relación de Poisson	Esfuerzo de cedencia (MPa)
Aluminio 6061	6.89E+4	2.7E-9	0.33	275
Acero	2.05E+5	7.7E-9	0.3	250
ABS	2.24E+3	1.06E-9	0.38	20
PRFC*	1.33E+5	1.43E-9	0.39	300

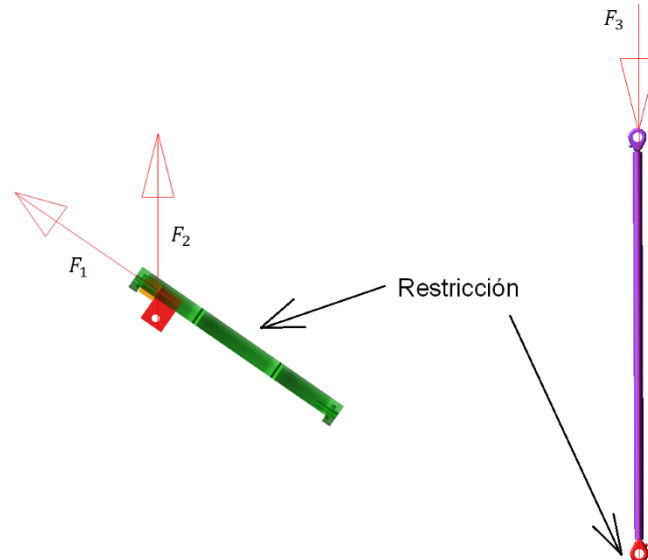
*\*PRFC, polímero reforzado con fibra de carbono.*

El segundo estudio realizado es un análisis de pandeo, un tipo de falla muy común en elementos críticos de soporte de cargas como columnas y otros elementos esbeltos en compresión [Gere, 2016]. En palabras de [Pytel, 2011], una columna es un elemento axial sometido a compresión, lo bastante delgado respecto de su longitud para que bajo la acción de una carga gradualmente creciente se rompa por flexión lateral o pandeo ante una carga mucho menor que la necesaria para romperlo por aplastamiento. El análisis por pandeo se enfoca en examinar el comportamiento estático de la barra de soporte ya que es una barra prismática cuya longitud es más de diez veces su dimensión transversal, además de que está sometida a compresión. Como resultado de este análisis se obtuvo el valor del factor crítico, un parámetro con el cual es posible conocer la carga crítica la cual indica los límites tolerables de carga a la cual la barra de soporte puede someterse permaneciendo recta.

### Configuración previa al análisis estructural estático

Para comenzar el análisis de elemento finito se deben establecer algunos parámetros para configurar la simulación, los más destacados son la restricción de movimiento que se le aplica a los componentes, así como las magnitudes y puntos de aplicación de las cargas (en Newtons) que actuarán sobre estos. En la figura 6 se muestran los diagramas de cuerpo libre de los dos conjuntos de elementos mecánicos que serán analizados.

En la figura 6a se encuentra el conjunto corredera-bloqueador; estas piezas fueron inmobilizadas de la parte trasera de la base de la corredera y sobre este conjunto actúan dos cargas:  $F_1 = (-42.3763, +29.0053, +0.0743)$  es la fuerza de interacción que se origina por el contacto entre la corredera y el bloqueador, y  $F_2 = (0, +91.4364, 0)$  es la fuerza de reacción que ejerce el conjunto barra de soporte-rótula inferior sobre la corredera y el bloqueador. Por otra parte, en la figura 6(b) se muestra el conjunto barra de soporte-rótula inferior los cuales fueron restringidos en la superficie inferior de la rótula inferior, sobre ellos actúa una carga de compresión  $F_3 = (0, -91.4364, 0)$  generada por el peso de la mitad del cuerpo del usuario.



a) conjunto corredera-bloqueador. b) conjunto rótula inferior-barra de soporte.

Figura 6 Diagramas de cuerpo libre para el análisis estructural estático

Es importante recordar que la silla/exoesqueleto actualmente está fabricada con aluminio, por tanto, el primer análisis estructural estático se realizará considerando las propiedades mecánicas de dicho material. (Posteriormente se determinarán los resultados del análisis estructural estático de la silla/exoesqueleto bajo la suposición de que sus piezas están fabricadas con materiales distintos, de tal manera que sea posible comparar las ventajas y desventajas que estos ofrecen).

### 3. Resultados

La figura 7 indica que el esfuerzo máximo de compresión ejercida sobre el conjunto corredera-bloqueador fabricados de aluminio 6061 es de 3.538 MPa. Las principales zonas afectadas son los orificios de la corredera los cuales se unen a la rótula superior y a la barra de soporte, así como los dos extremos de las superficies en contacto de ambas piezas. La corredera presenta un esfuerzo máximo de 3.538 MPa.

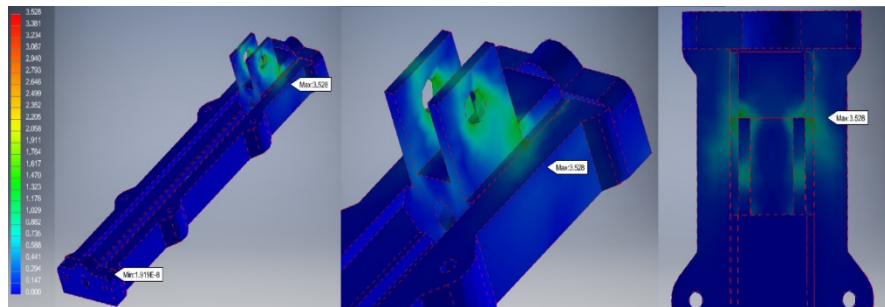


Figura 7 Análisis de elemento finito corredera, bloqueador y la base de la corredera.

Para determinar el factor de seguridad  $n$  se debe obtener la razón entre la resistencia real y la resistencia requerida, tal y como se muestra en la ecuación 1.

$$\text{Factor de seguridad, } n = \frac{\text{Resistencia real}}{\text{Resistencia requerida}} \quad (1)$$

Sustituyendo la resistencia requerida (3.538 MPa) y la resistencia real (esfuerzo de cedencia del aluminio 6061 de la tabla 3 en la ecuación 1, obtenemos:

$$\text{Factor de seguridad, } n = \frac{275}{3.538} = 77.727$$

Para evitar la falla el factor de seguridad debe ser  $>1.0$ , por lo tanto, para las condiciones dadas de carga y material de fabricación de las piezas, el factor de seguridad en ecuación 2 es muy grande. [Gere, 2016] menciona que cuando el factor de seguridad es muy bajo, la probabilidad de falla será alta, y la estructura inaceptable; si es muy grande, la estructura será un desperdicio de materiales y tal vez inadecuada para su función (por ejemplo, podría ser muy pesada).

Con respecto al análisis estructural realizado al conjunto de componentes de la figura 8, se sabe que la pieza que está sometida a mayor esfuerzo es la rótula superior con un valor de 3.044 MPa en la sección de acoplamiento con la barra de soporte (figura 8a). La rótula inferior también presenta esfuerzo en su acoplamiento con la barra de soporte (figura 8b), y la barra de soporte permanece casi intacta (figura 8c). El factor de seguridad para este conjunto de componentes es de  $n = 90.341$ , lo cual es un factor de seguridad  $\gg 1$  para las condiciones de carga dadas considerando que el material de fabricación es aluminio 6061.

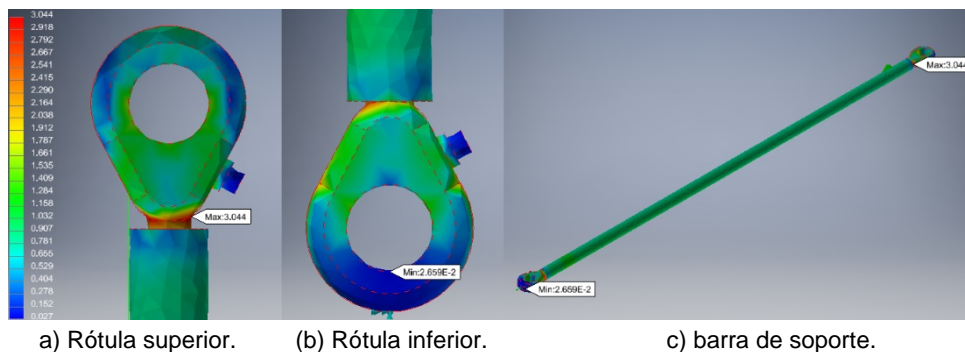


Figura 8 Análisis de elemento finito rótulas inferior y superior, y la barra de soporte.

Prosiguiendo con el análisis de resultados, la tabla 4 contiene información acerca de los factores de seguridad obtenidos al proponer tres materiales distintos para la fabricación de los elementos mecánicos de la figura 7: acero, plástico ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), y polímero reforzado con fibra de carbono (PRFC). El factor de seguridad mínimo en cada caso es distinto debido a los valores de esfuerzos de cedencia inherentes a cada material (ver tabla 3). Por otro lado, el esfuerzo máximo para los cuatro casos es muy similar ya que el análisis estructural realizado es estático, lo cual significa que la fuerza  $P$  que actúa sobre

el área transversal  $A$  de las piezas bajo consideración es la misma, tal y como lo estipula la ecuación  $\sigma = P/A$  para determinar la magnitud de los esfuerzos  $\sigma$ . La tabla 4 señala que para la carga estática ocasionada por la mitad del peso del usuario (32.5 kg) al sentarse sobre la silla/exoesqueleto, el aluminio 6061 presenta un comportamiento mecánico muy adecuado.

Tabla 4 Factores de seguridad de las piezas de la figura 7 usando cuatro materiales.

Materiales	Esfuerzo máximo (MPa)*	Factor de seguridad mínimo
Aluminio 6061	2.947	93.315
Acero	2.957	84.545
ABS	2.946	6.788
PRFC	2.949	101.729

\*Sometidas a las fuerzas de contacto de la corredera y el bloqueador, de la tabla 2.

De manera similar, el acero, y el PRFC, un material compuesto que se caracteriza por tener una combinación de ligereza de peso y elevada rigidez, cumplen de manera sobrada con el factor de resistencia requerido. Por último, el material con menor factor de seguridad es el ABS, un termoplástico que es comúnmente utilizado como material de impresión en impresoras 3D; su factor de seguridad no es muy grande ( $n = 6.788$ ), por lo cual es posible pensar que para el usuario de la silla/exoesqueleto este material cumple con las especificaciones de diseño. Esta aseveración es precipitada ya que es imprescindible considerar otros factores técnicos de diseño. El segundo análisis estructural estático se efectuó sobre las piezas de la figura 8 siguiendo el mismo procedimiento que se detalló anteriormente para las piezas de la figura 7. El resultado de este análisis se muestra en la tabla 5, la cual reitera las buenas propiedades de resistencia que los cuatro materiales proveen a las piezas de la silla/exoesqueleto; el aluminio, el acero, y el PRFC tienen un factor de seguridad  $\gg 1$ , y el factor de seguridad del plástico ABS es el más moderado.

Otro factor sustancial en el diseño técnico de la silla/exoesqueleto es su peso. El factor de peso debe estar íntimamente ligado al análisis estructural puesto que la masa total de la silla/exoesqueleto dependerá del material que se seleccione para la fabricación de sus componentes. La tabla 6 presenta la masa total de una de las

secciones de la silla/exoesqueleto (figura 4), al considerar cada uno de los cuatro materiales de interés para la fabricación de sus componentes.

Tabla 5 Factores de seguridad de las piezas de la figura 8 usando cuatro materiales.

Materiales	Esfuerzo máximo (MPa)*	Factor de seguridad mínimo
Aluminio 6061	4.735	58.078
Acero	4.804	52.039
ABS	4.496	4.448
PRFC	4.439	67.582

\*Sometidos a las fuerzas de contacto de la barra de soporte y las rótulas, de la tabla 2.

Tabla 6 Masa total de la mitad de la silla/exoesqueleto.

Materiales	Densidad (kg/mm <sup>3</sup> )	Masa total (kg)
Aluminio 6061	2.74E-06	0.521
Acero	7.801E-06	2.444
ABS	1.07E-06	0.334
PRFC	1.51E-06	0.472

De esta manera, la tabla 6 constata la importancia de seleccionar un material que proporcione un factor de seguridad moderado. De los cuatro materiales candidatos, el acero es el material que ocasionará que la silla/exoesqueleto sea mucho más pesada (2.444 kg); el aluminio es un material resistente y ligero de uso general que mantiene el peso de la silla/exoesqueleto dentro de los límites tolerables (0.521 kg), e incluso su ligereza está cerca de la ligereza que proporciona el PRFC (0.472 kg); por último, el material con el cual la silla/exoesqueleto será más liviana es el plástico ABS con un peso de (0.334 kg). Para finalizar la evaluación del diseño de la silla/exoesqueleto, a continuación, en la tabla 7 se muestran los resultados del análisis de pandeo, el cual se enfoca en examinar a la barra de soporte debido a su posibilidad de fallar por flexión lateral a causa de la carga de compresión a la cual está sometida (figura 6b) en la configuración final de la silla/exoesqueleto.

Al considerar detenidamente los resultados de la tabla 7, algunas de las afirmaciones anteriores referentes a la selección de algún material en función de sus propiedades mecánicas pueden ya no ser válidas debido a la importancia que el análisis de pandeo adquiere.



Tabla 7 Resultados del análisis de pandeo.

Materiales	Factor crítico
Aluminio 6061	5.649
Acero	16.776
ABS	0.184
PRFC	10.982

El factor crítico (ecuación 3) establece una relación entre la carga aplicada (-91.4364 N), y la carga máxima (o carga crítica) a la que puede someterse la barra de soporte permaneciendo recta; para evitar la falla por pandeo el factor crítico debe ser >1.0.

$$\text{Factor crítico} = \frac{\text{Carga crítica}}{\text{Carga aplicada}} \quad (3)$$

De este modo, los resultados de la tabla 7 demuestran las condiciones de rigidez estructural de la barra de soporte, para soportar y transmitir el peso del usuario. Para incrementar la carga crítica de la barra de soporte debe elevarse la rigidez por flexión usando un material más rígido, es decir, utilizando un material con mayor módulo de elasticidad [Gere, 2016]. Siguiendo esta idea, es razonable observar que el acero sea el material con el factor crítico más grande, seguido por el PRFC. El aluminio tiene aproximadamente una tercera parte del factor crítico del acero, lo cual es un valor moderado que satisface los requerimientos técnicos de diseño, y el plástico ABS tiene un factor crítico <1.0, lo cual prevé la falla por pandeo de la barra de soporte tal como lo muestra la figura 8.

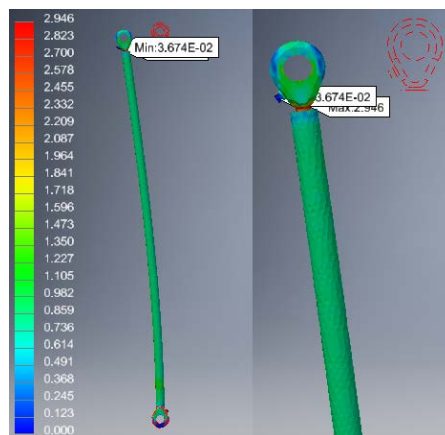


Figura 8 Pandeo barra de soporte considerando el plástico ABS para su fabricación.

Dado que ahora ya se cuenta con la información suficiente acerca del comportamiento mecánico de los materiales candidatos, a continuación, se realiza una comparación para determinar cuál ofrece un equilibrio entre resistencia de la estructura, rigidez del material, peso de los componentes, y el costo del material. Comenzando la examinación con los resultados del análisis de pandeo, el material que debe descartarse en primer lugar es el plástico ABS ya que su factor crítico es  $<1.0$  lo cual indica que la barra de soporte indudablemente fallará por pandeo. Por otro lado, el segundo material que se descarta es el acero debido a que el peso que tendría la silla/exoesqueleto es excesivo para la aplicación, considerando que la silla/exoesqueleto debe ser liviana ya que el usuario la cargará y llevará acoplada a su cuerpo. El tercer material a descartar es el PRFC; aunque ofrece ventajas respecto a los otros tres materiales como ligereza y una rigidez similar a la de los metales, es un material costoso. Por tanto, el material que mantiene un equilibrio entre los cuatro factores que se han analizado es el aluminio 6061.

#### **4. Discusión**

Cada uno de los cuatro materiales demuestra cualidades y deficiencias en el diseño de la silla/exoesqueleto. El aluminio es el material que establece un balance de los cuatro aspectos cualitativos que se examinan para la selección del material de fabricación; soporta el peso del usuario en turno (65 kg), e incluso presenta un factor de seguridad  $n > 1.0$  lo cual indica que una persona más pesada puede utilizar la silla/exoesqueleto, considerando en todo momento que el factor crítico sea  $> 1.0$  para que la barra de soporte no falle por pandeo. Adicionalmente, al utilizar aluminio la silla/exoesqueleto es ligera (aproximadamente 1 kg, más el peso de las cintas adheribles que la acoplan al cuerpo del usuario). Los otros materiales también ofrecen características adecuadas, no obstante, sus deficiencias tienen un mayor efecto en el diseño de la silla/exoesqueleto. Otra opción que puede resultar conveniente es emplear dos tipos de materiales para la fabricación de los componentes de la silla/exoesqueleto, por ejemplo, el plástico ABS para el conjunto corredera-bloqueador, y para la barra de soporte y las rótulas aluminio. Así, se podrían aprovechar las cualidades de estos materiales.

## **5. Conclusiones**

Mediante el análisis estructural estático y de pandeo ha sido posible caracterizar el comportamiento mecánico de la silla/exoesqueleto bajo la suposición de que está fabricada con los materiales candidatos; cada uno de estos atribuye cualidades favorables para el diseño de la silla/exoesqueleto, no obstante, también tienen efectos adversos al concepto ergonómico que se busca instaurar en la misma. El material que demuestra un equilibrio entre rigidez, ligereza, resistencia a fallar por pandeo, y aspectos económicos es el aluminio; la silla/exoesqueleto fabricada con aluminio soporta eficazmente al usuario estándar. Otro aspecto trascendental que se evidenció por medio de estos análisis es la importancia de la barra de soporte en el diseño de la silla/exoesqueleto expuesta en esta investigación, es decir, el que un material propuesto proporcione resistencia y ligereza no significa que es el idóneo; para llegar a esta decisión debe analizarse que no falle por pandeo como sucedió con el plástico ABS. Mediante este estudio de diseño se estableció una metodología que puede ser utilizada por otros investigadores para prever las condiciones bajo las cuales sus sistemas exoesqueletos se desempeñan adecuadamente. Por otro lado, se ha demostrado por medio de simulaciones que el mecanismo de soporte y descarga hacia el piso de la silla/exoesqueleto cumple su función, no obstante, aún se puede optimizar el diseño para ser tan eficientes como las sillas/exoesqueletos que se están comercializando. Como trabajo a futuro, se realizará el análisis de fatiga de los componentes mecánicos de la silla/exoesqueleto.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] D. Sanz-Merodio, M. Cestari, J. C. Arevalo, and E. García. Gait parameter adaption for lower-limb exoskeletons. IWBBIO, Granada, March 2013.
- [2] Gere J. M., Goodno B. J. Mecánica de Materiales, 8ª ed., Cengage Learning Editores, México, DF, 2016.
- [3] NITTO Co. (2015). Archelis ®: [www.archelis.com/](http://www.archelis.com/).
- [4] H. Zurina, A. Fatin, Musa, M. Hafizuddin, M. H. Aizuddin. The Design and Development of Lower Body Exoskeleton, Part 1, 2<sup>nd</sup> IDPC, Malaysia, 2015.

- [5] Lockheed Martin Co. (2016). Fortis ® Exoskeleton: [lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/industrial](http://lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/industrial).
- [6] López R., Torres J., Salazar S., Lozano R. Desarrollo de un Exoesqueleto para Rehabilitación de Tobillo y Rodilla, RMIB, Vol.35, Abril 2014, pp.13-28.
- [7] Noonee (2014). Noonee ®: [www.noonee.com/](http://www.noonee.com/).
- [8] Pytel A., Singer F. L. Resistencia de Materiales, 11<sup>ra</sup> ed., Alfaomega Grupo Editor, México, 2011, pp. 356-358.
- [9] Suhail P. S., Akhil R., Muhammed A., Mohammed M. A., Premkrishnan P. Fabrication and Analysis of Chairless Chair, IJIRSET, Vol. 7, 4, April 2008.
- [10] US Bionics Inc. (2018). legX®: <https://www.suitx.com/legx>
- [11] Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement, 4<sup>th</sup> ed., John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2009, pp. 82-85.
- [12] Zoss A., Kazerooni H., Chu A. On the Mechanical Design of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX), 2005 IEEE/RSJ.

# **DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS A LAZO ABIERTO PARA MOTORES BLDC**

## *DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN OPEN-LOOP TEST-BED FOR BLDC MOTORS*

**Lesslie Arantxa Sosa González**

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*lesslie.sosa@gmail.com*

**Victor Arturo Maldonado Ruelas**

Universidad Politécnica de Aguascalientes  
*victor.maldonado@upa.edu.mx*

### **Resumen**

En este trabajo se reporta la construcción de un banco de pruebas a lazo abierto para motores de corriente directa sin escobillas (BLDC). El banco permite hacer pruebas de desempeño a una variedad de motores con características de baja potencia (hasta 45 Watts). El sistema adquiere señales de interés, en un inicio para un sistema de lazo abierto que ayuden a validar resultados o teorías vistas en simuladores a estudiantes y/o investigadores. Además, el banco de pruebas, cuenta con una estructura física que permitirá realizar sistemas de control en lazo cerrado o alguna otra investigación relacionada con este tipo de motores.

**Palabras Claves:** Adquisición de señales, banco de pruebas, BLDC.

### **Abstract**

*In this work, the construction of an open-loop test bench for Brushless Direct Current (BLDC) motors is reported. The test bench allows preliminary testing of a variety of motors with low power characteristics (up to 45 Watts). The system acquires signals of interest, initially for an open-loop system that helps to validate results or theories seen in simulators to students or researchers. In addition, the test bench has a physical structure that will allow for closed-loop control systems or other research related to this type of motors.*

**Keywords:** BLDC, test bench, signals acquisition.

## **1. Introducción**

Los motores eléctricos juegan un papel muy importante en muchos aspectos de la vida diaria. A pesar de que su función básica es convertir la energía eléctrica en energía mecánica, esta función se utiliza para realizar una variedad enorme de tareas. Entre los tipos de motores que existen en la actualidad, el BLDC es una opción muy atractiva para el diseño de servomecanismos donde se requiere aplicaciones de par y/o altas velocidades de precisión.

Un BLDC es un tipo de máquina síncrona, en la cual el campo de excitación ha sido reemplazado por un imán permanente. Las corrientes del estator están controladas mediante detectores de posición y electrónica de potencia [Baldursson, 2005]. Estos motores requieren un control más complejo, pues implica conocer la posición del rotor para poder alimentar al motor, incluso en lazo abierto. Diversos trabajos [Tibor, 2011], [Da, 2011], [Tashakori, 2013], [Usmant, 2016] presentan diversas aplicaciones de control de estos motores en diferentes áreas de investigación.

Académicamente, el estudio de los motores BLDC ha tomado un rumbo muy interesante en el ámbito de control, ya que en la actualidad este tipo de motores se emplean en áreas como la aeroespacial, la robótica y la automotriz. Por tanto contar con un banco de pruebas que permita adquirir señales como corrientes, voltajes y velocidad, dará a conocer una mejor perspectiva de estas máquinas eléctricas.

Algunos bancos de pruebas en motores eléctricos se han presentado para validar trabajos de investigación o aplicaciones industriales [Wu, 2012], [Lei, 2016], [Mazaheri, 2017]. Por tanto, el contar con un sistema en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes que ayude al trabajo académico y de conocimiento, es de relevancia debido a su bajo costo de implementación.

## **2. Métodos**

### **Estrategia de conmutación**

La razón por la que los motores BLDC se han vuelto tan populares en los últimos años, es por sus buenas características de par, velocidad y control simplificado [Modrack, 2013]. Las técnicas de control de los motores con sensores se clasifican según el algoritmo a control a utilizar. Para este trabajo se utilizará la conmutación

trapezoidal, ya que es el método más simple y el más empleado para controlar un BLDC. Las seis etapas de conmutación se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Secuencia de pasos para la conmutación trapezoidal.

Intervalo en grados	Paso	Interruptores Cerrados		FASE A	FASE B	FASE C
0° a 30°	1	Q1	Q4	+	-	NC
30° a 60°	2	Q1	Q6	+	NC	-
60° a 90°	3	Q3	Q6	NC	+	-
90° a 120°	4	Q3	Q2	-	+	NC
120° a 150°	5	Q5	Q2	-	NC	+
150° a 180°	6	Q5	Q4	NC	-	+

### Microcontrolador dsPIC30F4011

Para este trabajo se decidió utilizar el dsPIC30F4011 de 16 bits de la familia Microchip, ya que el módulo de modulación de ancho de pulso (PWM) para el control de motores en los dsPIC30F4011, simplifica la tarea de generar múltiples salidas PWM [Microchip, 2003]. Para la programación del algoritmo basado en la conmutación trapezoidal, las señales de posición del rotor se miden por medio de sensores de efecto Hall. De trabajos anteriores donde se realizaron pruebas prácticas al motor, la frecuencia del PWM se fijó a 10KHz. El registro que define el valor del periodo (PTPER) queda determinado como se muestra en la ecuación 1.

$$PTPER = \frac{FCY}{FPWM * (PTMR Prescaler)} - 1 \quad (1)$$

Donde  $FCYV = 30 \text{ MHz}$ ,  $FPWM = 10 \text{ KHz}$  y  $PTMR Prescaler = 1:1$ . Por lo tanto, el valor numérico de (PTPER) se define la ecuación 2.

$$PTPER = \frac{30,000,000}{10,000 * 1} - 1 = 3,000 - 1 = 2,999 \quad (2)$$

El cálculo para determinar el ciclo útil con los registros (PDCx) queda expresado en la ecuación 3.

$$Duty Cycle = \frac{PDCx}{(PTPER + 1) * 2} \quad (3)$$

La electrónica de potencia se realiza por medio de 3 interruptores electrónicos (IGBT) en la parte alta del inversor (1H, 2H y 3H) con un PWM determinado por los registros antes explicados; mientras que para cerrar el circuito y que la corriente fluya adecuadamente habrá otros 3 IGBT en la parte inferior del inversor (1L, 2L y 3L). De esa manera se tiene un PWM en un IGBT y un estado lógico alto en otro IGBT. Para conseguir esta secuencia en el algoritmo, se hace uso del registro OVDCON como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 Registro OVDCON<7:0>.

Estado	OVDCON <15:8>	OVDCON <7:0>
1	00000000b	00100100b
2	00000000b	00100001b
3	00000000b	00001001b
4	00000000b	00011000b
5	00000000b	00010010b
6	00000000b	0000110b

Al hacer esa modificación en el registro se tiene como resultado una salida en los PWM como se muestra en la figura 1, donde se puede apreciar que solo son salidas en alto y bajo, sin la generación del PWM.

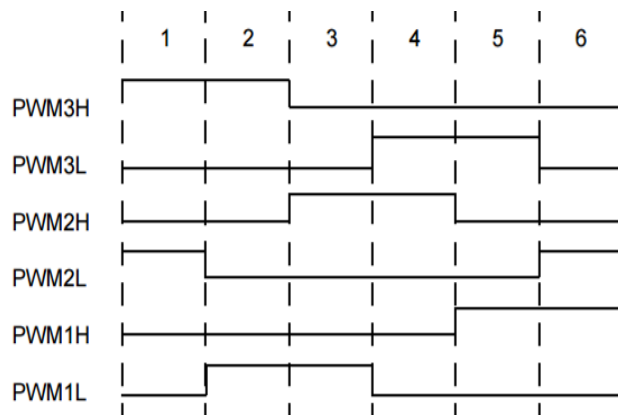


Figura 1 Salida del PWM con el registro OVDCON<7:0>.

En la tabla 3 se muestra un ejemplo de escritura en el registro y sus determinadas salidas para generar salidas de PWM como se muestra en la figura 2.



Tabla 3 Registro OVDCON<15:8>.

Estado	OVDCON <15:8>	OVDCON <7:0>
1	11000011b	00000000b
2	11110000b	00000000b
3	00111100b	00000000b
4	00001111b	00000000b

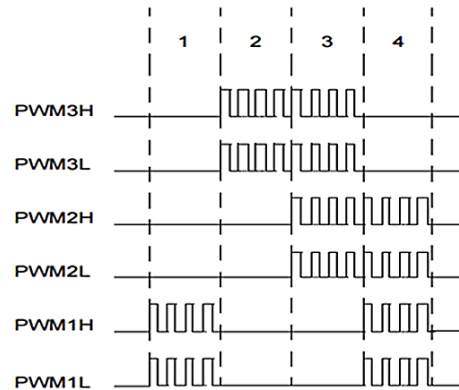


Figura 2 Salida del PWM con el registro OVDCON<15:8>.

### Sensores de Efecto Hall

La posición del rotor puede ser detectada mediante sensores de efecto Hall (Sensored), o midiendo la fuerza contraelectromotriz (Sensorless). En este trabajo se aprovecha que los sensores vienen integrados en el BLDC. El motor lleva tres sensores separados cada uno por 60° eléctricos y cada sensor da como salida un estado lógico en ‘alto’ cada 180° eléctricos de rotación, así como un estado lógico ‘bajo’ los siguientes 180°. Un diagrama de conmutación se muestra en la figura 3.

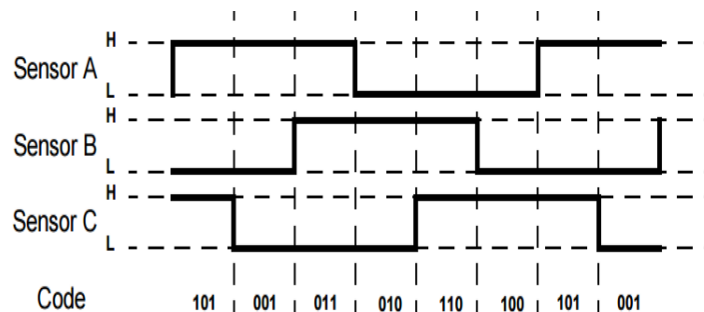


Figura 3 Secuencia de conmutación de los sensores hall.

El diagrama esquemático para la conexión de los sensores del motor con el DSP se muestra en la figura 4.

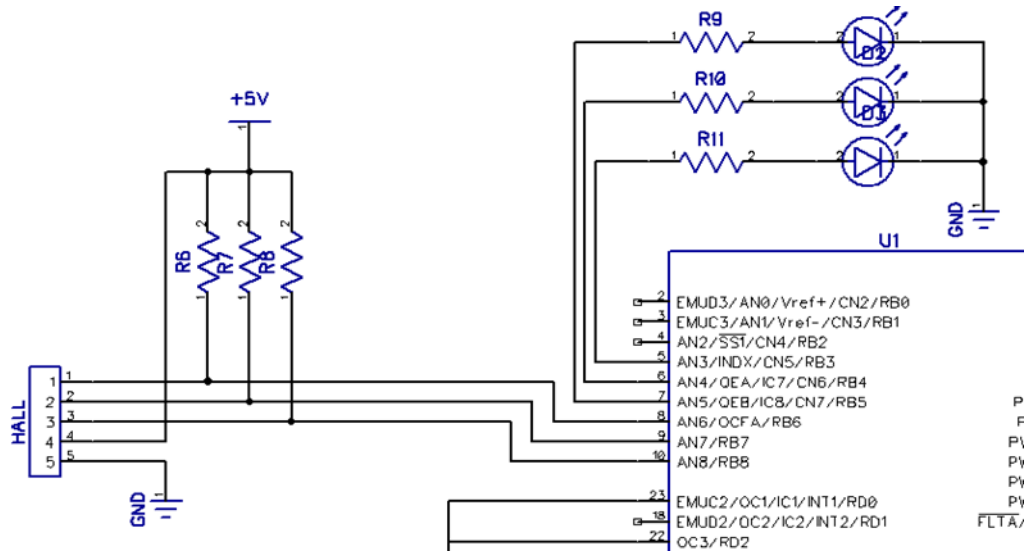


Figura 4 Sensores de efecto Hall conectados al DSP.

## Encoder

Para este trabajo se utilizó un encoder óptico incremental HEDS-9100 del fabricante Avago Technologies. En la figura 5 se puede ver el acople del disco con el rotor del motor. Las salidas que entrega el encoder son las señales eléctricas 'A' y 'B' que se encuentran desfasadas 90° una de la otra; esto permite detectar un cambio de giro en el rotor del motor. Para esta aplicación, solamente se utilizó la salida 'A' para realizar un conteo y medir la velocidad. La circuitería utilizada se muestra en la figura 6.

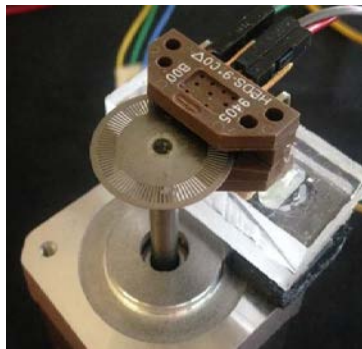


Figura 5 Disco ranurado con encoder acoplado al rotor.

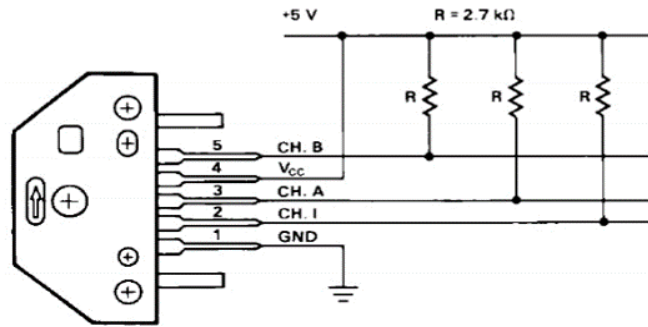


Figura 6 Arreglo pull-up para mandar las salidas del encoder al dsPIC.

### Motor BLDC Hetai 42BLF02

El motor seleccionado para trabajar con el banco de pruebas es el 42BLF02 de Hetai Motors. Este motor maneja una potencia de 52 W a 24 V, ofrece una velocidad y par de buenas características para su tamaño, la figura 7 se muestra una imagen del motor a utilizar. El motor cuenta con un embobinado en estrella, tiene acoplados los sensores de efecto Hall con un ángulo de 60° eléctricos de separación entre ellos [Hetai, 2014].

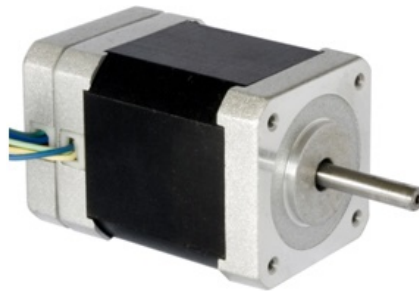


Figura 7 Motor sin escobillas Hetai 42BLF02.

### Aislamiento óptico

Esta etapa es básica para proteger el dispositivo de control de posibles fallos en la etapa de potencia y minimizar los daños en los dispositivos de control. La frecuencia de conmutación es un parámetro fundamental que se debe tener en cuenta para la selección del dispositivo de acople, por tanto, se seleccionó el PS2501 el cual es un integrado que posee un tiempo de subida de 3  $\mu$ s y de bajada típico de 5  $\mu$ s [California, 2010]. El circuito de aislamiento implementado se muestra en la figura 8.

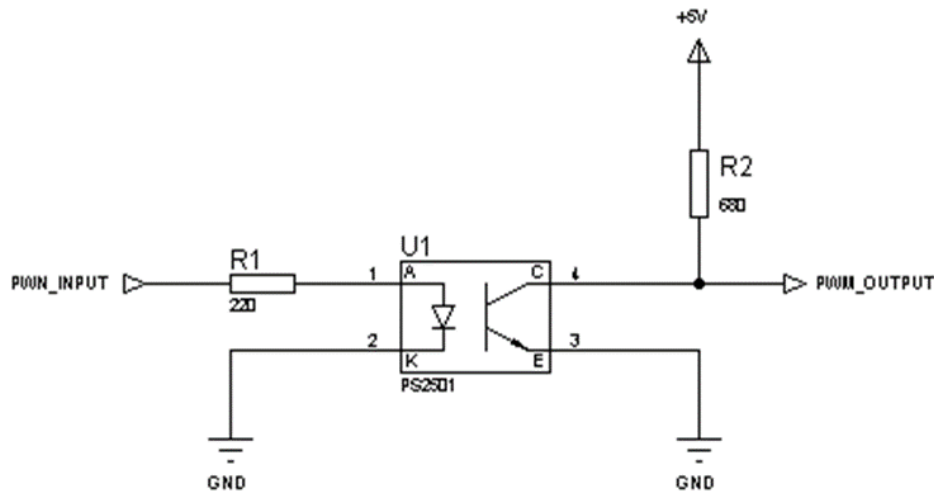


Figura 8 Circuito de aislamiento con PS2501.

### Driver de compuerta

Para activar o desactivar adecuadamente un IGBT es necesario diseñar un circuito que garantice la transición de estados en el menor tiempo. Esta exigencia la satisface el circuito de disparo IR2110, de la compañía International Rectifier (IR). Con el circuito de disparo IR2110 se dispone una solución compacta para disparar simultáneamente a un IGBT referido a tierra y a otro referido a un nivel de alta tensión, capaz de oscilar entre +500 V y -5 V respecto del terminal de tierra. Además, dispone de un rango entre 5 y 20 V de alimentación y sus entradas de voltaje son compatibles con niveles TTL y CMOS. Al poder alimentar dos IGBT de una misma rama hace necesaria la implementación de 3 circuitos idénticos para activar los 6 IGBT del sistema. En la figura 9 se muestra el circuito excitador por fase.

El circuito driver IR2110 tiene diferentes terminales de control y de alimentación. Una señal lógica alta en HIN, significa que se quiere conducir el IGBT superior del sistema en el medio puente inversor por medio de la terminal VBO; por lo contrario, una señal lógica baja significa que desea apagar. La salida de HO (alta o baja) no es con respecto a tierra, sino con respecto a VS.

Por el contrario, una señal alta en LIN significa que se quiere conducir el IGBT inferior de la rama. Una señal lógica alta es igual al nivel de VCC, con respecto a VSS. Cuando la señal lógica es baja el nivel en LS es igual a VSS, es decir, 0 volts.

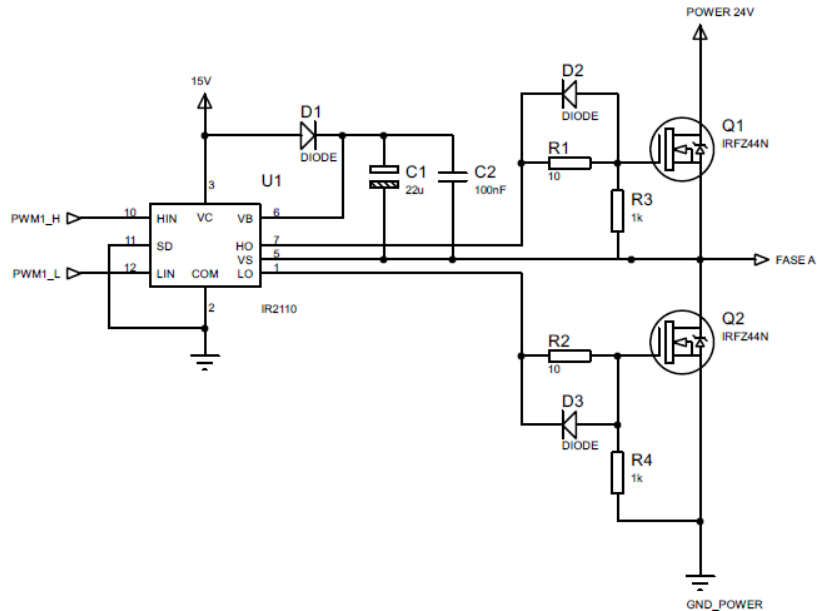


Figura 9 Diagrama de IR2110 por fase.

### Circuito Bootstrap

El circuito de disparo bootstrap se compone por un diodo y un capacitor tal como se muestra en la figura 10. El principio de funcionamiento es cuando el voltaje entre las terminales VB y VS del circuito de control, proporciona la tensión de alimentación a la circuitería de impulsor de control flotado. Esta fuente necesita estar en un intervalo de 10V a 20V para asegurar que en el circuito de control pueda funcionar el transistor de compuerta del IGBT que está siendo impulsado.

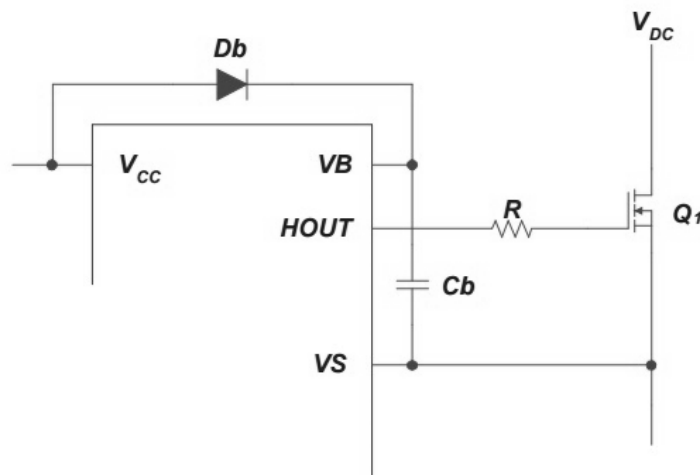


Figura 10 Circuito Bootstrap utilizado con el circuito integrado IR2110.

## Inversor Trifásico

El inversor trifásico está compuesto por una fuente de corriente directa y por dispositivos de electrónica de potencia operando en corte y saturación, con una secuencia apropiada para obtener tres tensiones de salida simétricas y balanceadas [Murillo, 2008]. La figura 11 muestra la topología de un inversor trifásico en puente completo, el cual se compone de 6 transistores IGBT. Específicamente se utilizó el IRFZ44N fabricado por International Rectifier, con los que se construyó cada media rama del inversor. Estos IGBT soportan 49 A de corriente y un voltaje de 55V entre colector y emisor.

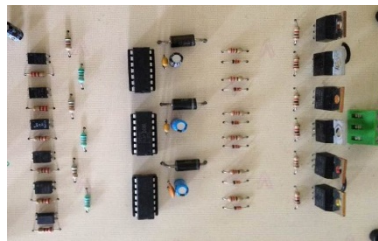


Figura 111 Placa de potencia diseñada.

## Entorno Labview

El diseño de la interfaz gráfica para el control de velocidad del motor BLDC requirió de varios elementos gráficos que dieron como resultado un software útil y versátil utilizando la plataforma de Labview [National, 2016]. En la figura 12 se muestra la pantalla principal del sistema.

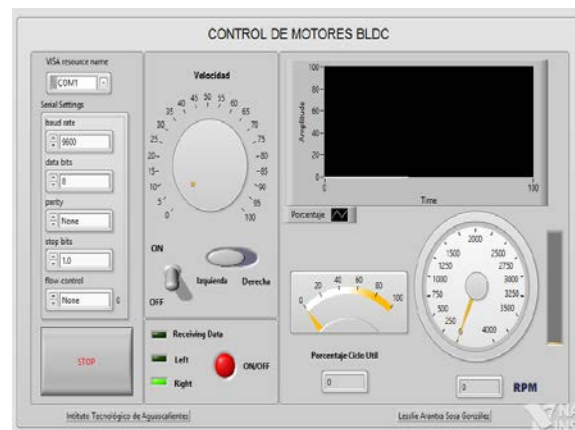


Figura 122 Interfaz gráfica para el control de motores BLDC.

La interfaz se dividió en 4 grupos principales:

- Bloque de Comunicación
- Bloque de Comandos Control
- Bloque de Estado
- Bloque de Respuesta

El bloque de comunicación en la parte de la interfaz gráfica se ubica en la parte superior izquierda. La interfaz requería una comunicación serial Half-Duplex, es decir, tanto el procesador digital de señales (DSP) como el ordenador, enviarán y recibirán datos de una manera particular de acuerdo a los comandos que se reciban. Por esta razón, se decidió utilizar el objeto de VISA que permite la comunicación serial en Labview.

Para controlar los aspectos principales del motor, se utiliza el bloque de control ubicado en la parte del centro de la interfaz gráfica. Dentro de este panel se encuentran tres objetos primordiales. El primero es un "Knob" que controla la velocidad del motor, el cual se encontrará en un rango entre un 0% y un 100%, con la tarea principal de controlar el PWM del DSP. El siguiente objeto a describir es el switch ON/OFF, enciende o apaga el motor. Por último el switch de sentido de giro del motor.

El bloque de estado permite observar cuales acciones son las que esta implementando el software. Se ubica en la parte central de la interfaz principal, justo por debajo del bloque de control.

El bloque de respuesta da información referente al estado actual del motor y responde a los datos que recibe del DSP. Se ubica en la parte superior derecha del panel.

### **3. Resultados**

Para las pruebas realizadas se enviaron diferentes valores para el registro del PWM desde la interfaz gráfica en Labview, con el fin de apreciar el cambio en el ciclo útil. La tabla 4, contiene información de los diferentes valores del registro enviados desde el ordenador, los valores teóricos, tanto de tiempo y porcentaje del

valor enviado, así como el valor real del ciclo útil medido con el osciloscopio en tiempo y en porcentaje.

Tabla 4 Relación de ciclos útiles calculados y reales con datos enviados del ordenador.

Valor del Registro Enviado	Valores Teóricos		Valores Reales	
	Tiempo	Porcentaje	Tiempo	Porcentaje
1000	16.66 $\mu$ s	16.66 %	16.92 $\mu$ s	16.92 %
1500	25 $\mu$ s	25 %	26 $\mu$ s	26 %
2000	33.33 $\mu$ s	33.33 %	33.81 $\mu$ s	33.81 %
2500	41.67 $\mu$ s	41.67 %	42.30 $\mu$ s	42.39 %
3000	50 $\mu$ s	50 %	50.80 $\mu$ s	50.80 %
3500	58.34 $\mu$ s	58.34 %	59.40 $\mu$ s	59.40 %
4000	66.67 $\mu$ s	66.67%	67.79 $\mu$ s	67.79 %
4500	75 $\mu$ s	75 %	76.25 $\mu$ s	76.25 %
5000	83.34 $\mu$ s	83.34 %	84.80 $\mu$ s	84.80 %
5500	91.68 $\mu$ s	91.68 %	93.38 $\mu$ s	93.38 %

La figura 13 muestra una relación de tiempos donde se aprecia que el tiempo teórico y el tiempo real no tienen una diferencia significativa. Además de las pruebas para verificar el correcto funcionamiento del PWM con los datos enviados del ordenador, se realizaron pruebas de velocidad con determinados ciclos útiles. El DSP está programado para recibir la cadena con el nuevo valor de registro, encendido apagado y sentido de giro; a cambio entrega el conteo del encoder en un segundo.

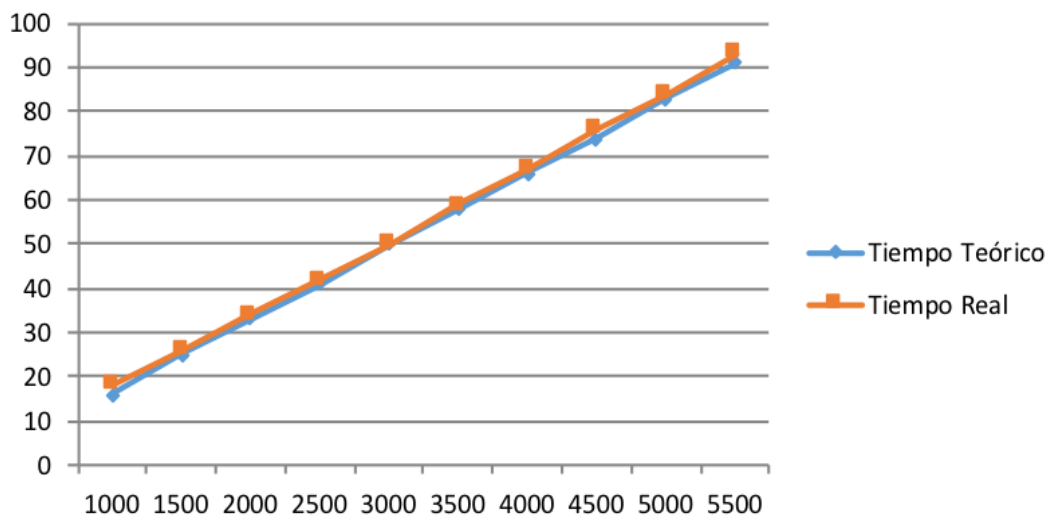


Figura 13 Gráfico del comportamiento del ciclo útil teórico y real.



En la tabla 5 se resumen las pruebas de ciertos valores de ciclo útil con el conteo recibido en la interfaz gráfica y la relación de las revoluciones por minuto (RPM).

Tabla 5 Pruebas de ciclo útil y valores recibidos.

Valor del Registro Enviado	Conteo Recibido	Valor de las RPM
1000	1785	1080
1500	3111	1860
2000	4123	2460
2500	4907	2940
3000	5513	3300
3500	5946	3540
4000	6316	3780
4500	6579	3900
5000	6740	4020
5500	6977	4140

La tabla 6 contiene el valor del registro enviado, la frecuencia medida del encoder, el periodo, las RPM de acuerdo al periodo medido con el osciloscopio (RPM reales) y las RPM calculadas de acuerdo a la medición del encoder con el DSP (RPM calculadas).

Tabla 65 Valores registrados de velocidad real y velocidad calculada.

Valor del Registro	Frecuencia del encoder	Periodo	RPM reales	RPM calculadas
1000	1.770 kHz	564.97 $\mu$ s	1,062	1,080
1500	3.039 kHz	329.05 $\mu$ s	1,823	1,860
2000	4.149 kHz	241.02 $\mu$ s	2,489	2,460
2500	4.953 kHz	201.89 $\mu$ s	2,972	2,940
3000	5.755 kHz	173.76 $\mu$ s	3,453	3,300
3500	6.452 kHz	154.99 $\mu$ s	3,871	3,540
4000	6.896 kHz	145.01 $\mu$ s	4,138	3,780
4500	7.289 kHz	137.19 $\mu$ s	4,373	3,900
5000	7.813 kHz	127.99 $\mu$ s	4,688	4,020
5500	8.259 kHz	121.08 $\mu$ s	4,955	4,140

La figura 14 muestra la discrepancia entre las RPM reales y las calculadas con los valores enviados del DSP. La diferencia empieza a ser significativa cuando se envía el valor 3,000 al registro del PWM. Una causa de este fenómeno puede asociarse a

que el procesador estaba realizando un proceso de envío/recepción de datos y perdió algún conteo del encoder, es por eso, que la velocidad calculada es menor que la velocidad real. Este fallo en el programa puede corregirse si se cambian las prioridades del vector de interrupciones del dsPIC30F4011, donde la interrupción externa 0 tendría mayor prioridad antes de una interrupción por recepción.

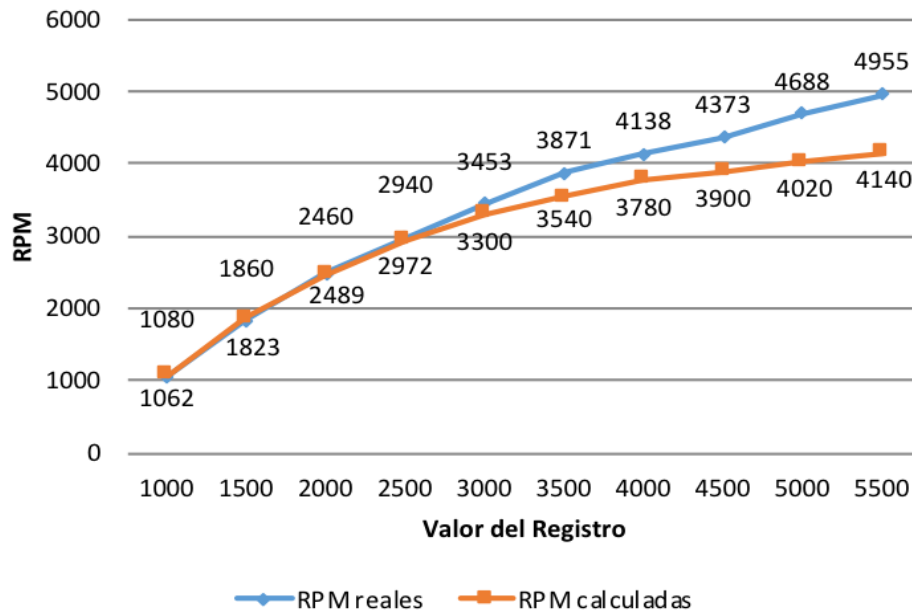


Figura 14 Gráfico de velocidad real contra velocidad calculada.

## 4. Discusión

### Sobre la interfaz de potencia

El diseño de un inversor trifásico de tres ramas con IGBT para el control de motores BLDC de baja potencia permitió la aplicación de una gran cantidad de conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, principalmente de la materia de electrónica de potencia. El inversor se diseñó para trabajar con la conmutación trapezoidal, pero la flexibilidad del mismo le permite trabajar con cualquier otro método de conmutación deseado, siempre y cuando se respeten los límites de potencia determinados por los IGBTs. Los resultados obtenidos con las pruebas de velocidad demuestran que, tanto los optoacopladores, drivers de compuerta e IGBTs, trabajan de manera conjunta para ofrecer una solución ideal y funcional para la interfaz de potencia del banco de pruebas.

### **Sobre la interfaz de control**

La interfaz de control diseñada con base a un DSP de la familia de Microchip permitió programar y probar algoritmos de control basados en la conmutación trapezoidal para motores BLDC, pero no se limitó a la conmutación trapezoidal, sino que puede ser utilizada para programar algoritmos de control de mayor complejidad, e incluso puede ser adaptada o modificada para agregar sensores con las entradas de uso general que se dejaron disponibles. El diseño incluye componentes que le dan versatilidad, tales como comunicación serial, entradas de programación, LEDs indicadores, etc., los cuales resultaron ser muy útiles a la hora de conectar el banco de pruebas y realizar mediciones de velocidad. Esta interfaz de control, puede ser una excelente opción comparada con las tarjetas de desarrollo profesionales, las cuales pueden tener un costo muy por encima de los recursos disponibles de los estudiantes.

### **Sobre el software del controlador**

El desarrollo de un software de control basado en Labview permitió monitorear el control de la velocidad del motor BLDC y así poder detectar los errores en las mediciones de las RPM reales y las medidas. La herramienta fue de gran utilidad, ya que permitió controlar los principales aspectos del motor, tal como la velocidad, el sentido de giro y el estado de encendido o apagado del motor, sin necesidad de modificar código en el DSP. La principal función es el monitoreo de los cambios realizados por el usuario en tiempo real desde la interfaz en cualquier ordenador conectado a la interfaz de control.

## **5. Conclusión**

El banco de pruebas implementado, opera de manera de manera funcional usando una estrategia de conmutación básica y de lazo abierto para un motor BLDC de baja potencia. El diseño y construcción de la instrumentación electrónica para la medición de variables eléctricas como corrientes y voltajes, así como de variables como la velocidad y posición de rotor del motor, son de utilidad para las pruebas de rendimiento y caracterización de la máquina eléctrica.

La construcción del inversor con la topología de la electrónica de potencia presentada en el trabajo, permite probar diferentes motores con potencias similares e incluso de potencias más elevadas.

Las pruebas de velocidad muestran que la parte de potencia y control son funcionales y respetan la conmutación requerida para hacer girar el rotor del motor de una manera óptima.

El diseño del software del controlador, envía y recibe correctamente los datos necesarios para mantener una armonía en el banco de pruebas. No se pierde información de las señales adquiridas y se pueden generar diferentes frecuencias de conmutación de operación para el motor.

El banco queda listo y funcional para otras aplicaciones de investigación, donde existan oportunidades de mejora, como la programación, el entorno de gráfico, adquirir más señales de interés para realizar otro tipo de conmutaciones o controles de lazo cerrado.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Baldursson Stefán, BLDC Motor Modelling and Control – A Matlab®/Simulink®. Gothenburg, Sweden: Institutionen för Energi och Miljö, May 2005.
- [2] California Eastern Laboratories. (2010, febrero) [http://www.cel.com/pdf/data\\_sheets/ps2501.pdf](http://www.cel.com/pdf/data_sheets/ps2501.pdf).
- [3] Da Y., Shi X., Krishnamurthy M., (2011) Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for brushless permanent magnet machines, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Pages 1-7.
- [4] Hetai Motor. (2014) Promoco Motors. <http://www.promoco-motors.com/products/BLDC/42BLF%20Series.pdf>.
- [5] Microchip Technology Incorporated. (2003) Application Notes: <http://www.microchip.com/>.
- [6] Lei F., Du B., Liu X., Chai T., (2016) Optimization of an implicit constrained multy-physics system for motor wheels of electric vehicle, Energy, Volume 113, Pages 980-990.

- [7] Mazaheri A., Radan A., (2017) Performance evaluation of nonlinear kalman filtering techniques in low speed brushless DC motor driven sensor-less position system, *Control Engineering Practice*, Volume 60, Pages 148- 156.
- [8] Modrack Christoffer Nilsson Daniel, "Universal Embedded Motor Control," Göteborg, 2013.
- [9] Murrillo Duberney, Restrepo Carlos. Torres Carlos Andrés., "Diseño y construcción de un inversor trifásico," *Scientia et Technica* Año XIV, no. 40, pp. 37-42, diciembre 2008.
- [10] National Instruments Corporation. (2016, octubre) NI: <http://www.ni.com/labview/why/esa/>.
- [11] Tashakori A., Ektesabi M., (2013) Fault diagnosis of in-wheel BLDC motor drive for electric vehicle application, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Pages 925-930.
- [12] Tibor B., Fedak V., Durovsky F., (2011) Modeling and simulation of the BLDC motor in matlab gui, *Industrial Electronics IEEE International Symposium on*, Pages 1403-1407.
- [13] Usman A., Joshi B., Rajpurohit B., (2016) A review of modeling, analysis and control methods of brushless motors, *International Conference on Computation of Power Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, Pages 337- 343.
- [14] Wu Q., Tian W., (2012) Design of permanent magnet Brushless DC motor control system based on dsPIC30f4012, *Procedia Engineering*, Volume 29, Pages 1-7.

# **PROTOTIPO DE APOYO PARA EMULAR EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOCOLO MESI**

## *PROTOTYPE OF SUPPORT FOR EMULATING MESI PROTOCOL OPERATION*

**Rodrigo Vázquez López**

Instituto Politécnico Nacional  
*rodrigo\_em2@hotmail.com*

**Esther Viridiana Vázquez Carmona**

Instituto Politécnico Nacional  
*ev.vazquezc@gmail.com*

**Juan Carlos Herrera Lozada**

Instituto Politécnico Nacional  
*jlozada@ipn.mx*

**Miguel Hernández Bolaños**

Instituto Politécnico Nacional  
*mbolanos@ipn.mx*

**Magdalena Marciano Melchor**

Instituto Politécnico Nacional  
*mmarciano@ipn.mx*

### **Resumen**

En los sistemas multiprocesador los datos pueden residir tanto en distintos niveles de caché como en la memoria principal. Mantener la coherencia de los datos entre los diferentes cachés y la memoria principal se conoce como el problema de coherencia de caché, el cual se puede solventar con el uso de protocolos como MESI (Modified-Exclusive-Shared-Invalid). En este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo cuyo objetivo es explicar el funcionamiento del protocolo antes mencionado en cursos de arquitecturas avanzadas de computadoras vistos a nivel ingeniería. El prototipo emula el funcionamiento de un sistema multiprocesador de dos procesadores (cada uno con un único nivel de caché) y la memoria principal utilizando dos tarjetas Arduino. El sistema interactúa con el usuario por medio de botones para leer y modificar datos de la memoria, así

como pantallas que despliegan el contenido de las cachés y el estado en el que se encuentran.

**Palabras Claves:** Arduino, arquitecturas avanzadas de computadoras, coherencia de caché, protocolo MESI.

## **Abstract**

*In the multiprocessor systems data can reside in different cache memory levels as in the main memory. Maintaining data coherence between different caches and main memory is known as the cache coherence problem, which can be solved with the use of protocols such as MESI (Modified-Exclusive-Shared-Invalid). This paper presents the development of a prototype whose objective is the explanation of the aforementioned protocol in courses of advanced computer architectures seen at the engineering level. The prototype emulates the operation of a multiprocessor system with two processors and the main memory using two Arduino boards. The system interacts with the user through means of buttons to read and modify data from the memory, as well as the screens that display the contents of the caches and the state in which they are located.*

**Keywords:** *Advanced computer architectures, Arduino, cache coherence, MESI protocol.*

## **1. Introducción**

El desarrollo de los sistemas de cómputo ha crecido de manera exponencial en los últimos años de manera que han surgido nuevas arquitecturas multiprocesador o multinúcleo que permiten a los programadores aprovechar los recursos para paralelizar los diferentes procesos o tareas que requiere realizar un microprocesador. El cómputo paralelo surge para realizar tareas simultáneas de procesamiento de datos con el objetivo de aumentar la velocidad computacional [Tanenbaum, 2000]. En ocasiones, se utiliza una memoria especial de muy alta velocidad, llamada caché la cual se emplea en los sistemas de computadora para compensar la diferencia de velocidad entre el tiempo de acceso a la memoria principal y la lógica de procesador [Mano, 1994].

Uno de los inconvenientes que surgen cuando se trabaja con dos o más procesadores es el problema de la coherencia de caché, el cual ocurre cuando dos o más procesos ven a la memoria compartida a través de diferentes cachés, por lo cual existe el peligro de que una caché contenga datos actualizados, mientras que otra contenga datos erróneos [Stallings, 2006].

Para atacar el problema de coherencia de cachés, existen diferentes soluciones como los protocolos de sondeo, protocolo de invalidación de tres estados (MSI), el protocolo de invalidación de 4 estados (MESI), entre otros [Arnau, 2012].

El protocolo MESI, es un protocolo de coherencia de caché y coherencia de memoria que también se le conoce como protocolo Illinois por haber sido publicado por investigadores de la misma Universidad en 1984 [Papamarcos, 1998] variantes de este protocolo se usan en microprocesadores modernos tales como la familia Pentium de Intel [INTEL, 2018]. Dicho protocolo trabaja con 4 estados los cuales son:

- Modificado (Modified M): Indica que el valor en la caché ha sido modificado, por lo tanto, es necesario que los datos sean escritos otra vez en la memoria principal antes de realizar una lectura.
- Exclusivo (Exclusive E): Significa que una caché tiene una copia del bloque y no ha sido modificada (es decir la memoria principal está actualizada).
- Compartido (Shared S): Significa que potencialmente dos o más procesadores tienen este bloque en su caché en un estado no modificado.
- Inválido (Invalid I): Indica que esta línea de caché ya no es válida.

El seguimiento del protocolo MESI se torna complicado si solo se consulta el diagrama de estados, por lo que se han desarrollado algunos simuladores que permiten la visualización de los cambios de estado del protocolo MESI. En [Kehagias, 2016] se presenta un simulador interactivo de propósito educativo para explicar el funcionamiento del protocolo MESI por medio de animaciones interactivas, representando un sistema de cómputo con tres núcleos. El simulador se desarrolló en Visual Studio utilizando Unity y scripts escritos en lenguaje C#, mientras que [Mallya, 2015] presenta un estudio similar al anterior acerca del



rendimiento de los protocolos de coherencia de caché utilizando gem5, el cual es un simulador para la investigación de sistemas de arquitectura de computadoras. El trabajo reportado por [Gómez, 2009] presenta un simulador del protocolo MESI que se utiliza para mostrar el problema de coherencia de caché y explicar el proceso de la ubicación de la memoria caché en sistemas de memoria multinivel. Los resultados experimentales corresponden a un entorno real de enseñanza. [Laguéns, 2011] presenta un simulador de protocolos de coherencia de caché en flash que muestra animaciones interactivas los cambios. La herramienta es interactiva, lo cual facilita a alumnos observar los cambios de estado y transiciones. Ya que los autores consideran que otras herramientas son complejas y no permiten visualizar el funcionamiento de los protocolos. Por otra parte [Pimentel, 2013] centra su atención en el desarrollo de una herramienta que sirve para la comprensión de la administración de la información dentro de un sistema jerarquizado de memoria como sucede en los sistemas con procesadores de propósito general y particularmente en la memoria cache. Finalmente [Jones, 2018] emula el funcionamiento del protocolo MESI para una mejor comprensión a través de una aplicación web basada en Java Script, la cual consiste en un entorno con tres procesadores, una memoria, un bus de datos y un bus de direcciones que simulan el comportamiento de sistema multiprocesador.

Este trabajo aborda el desarrollo de un prototipo en el que se implementa el protocolo MESI con el propósito de ayudar a comprender el funcionamiento de dicho protocolo a través del uso de herramientas de desarrollo como la tarjeta Arduino. El prototipo representa una arquitectura de dos procesadores con un nivel de caché, conectados al sistema de memoria.

El desarrollo del trabajo presenta el diseño del sistema, los algoritmos implementados y finalmente las pruebas realizadas para la validación del prototipo.

## **2. Métodos**

La figura 1 presenta el esquema básico del prototipo, el cual está integrado por dos tarjetas Arduino MEGA, cada una de éstas representa un procesador con sus respectivas operaciones de lectura y escritura que se disparan por medio de dos

botones, adicionalmente cuentan con un switch para elegir las direcciones de memoria (se pueden seleccionar 4 direcciones). El sistema de memoria (RAM estática) se representa a través de una tarjeta Arduino UNO.

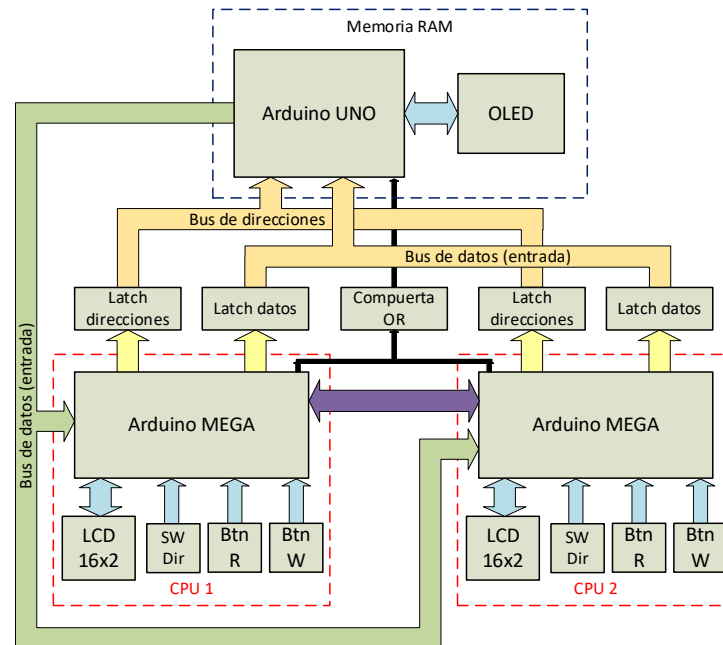


Figura 1 Esquema básico del prototipo.

Las pantallas LCD (2x16) muestran en tiempo real, el estado y valor interno de la caché de los procesadores. La pantalla OLED (128x64) despliega los valores internos de las cuatro direcciones de la memoria RAM. El resto de los bloques son circuitos de control adicionales, entre ellos los latches cuyo objetivo es evitar que los procesadores quieran escribir al mismo tiempo en los buses. Adicionalmente se requiere de una compuerta OR que sirva como control de acceso a la memoria. La elección de las tarjetas Arduino, se realizó con base en las características más apropiadas de cada tarjeta, por ejemplo, para implementar el diseño de los procesadores se requiere un número importante de conexiones de entrada/salida por lo que se seleccionó la placa Arduino MEGA debido a que cuenta con 54 entradas digitales. Para el diseño de la memoria bastó con las 14 entradas digitales que ofrece la placa Arduino UNO. En la tabla 1 se presentan las principales características de las tarjetas utilizadas [Arduino, 2018].

Tabla 1 Características de las tarjetas Arduino utilizadas.

Característica	Arduino UNO	Arduino MEGA
Microcontrolador	ATmega328P	ATmega2560
E/S digitales	14	54
Salidas PWM	6	15
Entradas analógicas	6	16
Memoria Flash	32 kb	256 kb
SRAM	2 kb	8 kb
Frecuencia de reloj	16 MHz	16 MHz

### Funcionamiento de la caché en el prototipo

El caché del procesador está representado como una variable dentro de Arduino la cual almacena los datos de la dirección de memoria (dos bits), el estado en el que se encuentra la caché (dos bits) y los datos de lectura (cuatro bits). Se decidió trabajar con un nivel de caché que permitiera almacenar la información de una dirección de memoria a la vez. Los valores contenidos en la caché están disponibles para el otro procesador por medio de la conexión entre los dos Arduinos. La figura 2 muestra de forma detallada las principales conexiones al bloque.

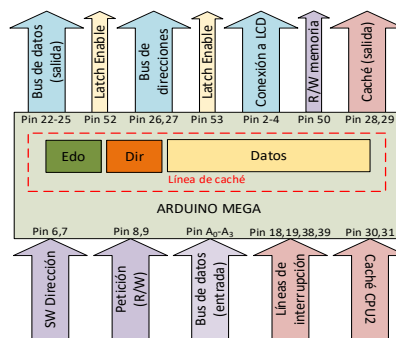


Figura 2 Conexiones principales de cada procesador.

### Diseño de la memoria

El diseño de la memoria se basa en el funcionamiento de una memoria RAM estática, la cual es utilizada especialmente para buffers de alta velocidad, cachés y registros [Dunning, 2018]. Cuenta con un espacio de 4 direcciones con un ancho de palabra de 4 bits los cuales están representados como una matriz de enteros dentro de Arduino. Las conexiones necesarias para el funcionamiento son: la señal

de habilitación del chip, una señal que indique la operación que debe realizar (lectura o escritura), conexión para recibir los datos de entrada y salida, así como la dirección de memoria, tal y como se observa en la figura 3.

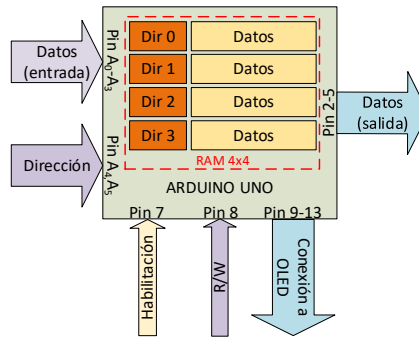


Figura 3 Conexiones principales de la memoria.

### Ciclos de lectura y escritura a memoria

En el ciclo de lectura el procesador coloca la dirección previamente leída por los switches en el bus de direcciones y habilita el latch asociado, a la memoria se le indica que se hará una operación de lectura y se activa la señal de habilitación. Por su parte la memoria realiza las operaciones que se observan en el diagrama de flujo de la figura 4. Una vez finalizado el proceso, el procesador lee los datos del bus de entrada y los coloca en la línea de caché.

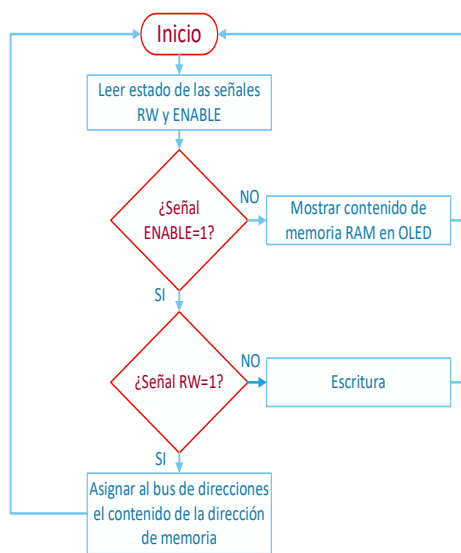


Figura 4 Ciclo de lectura de la memoria.

En el ciclo de escritura, el procesador coloca desde la caché el valor de la dirección y los datos en los respectivos buses, habilitando los latches. Inmediatamente, se le indica a la memoria que se hará una operación de escritura y se activa la señal de habilitación para realizar las operaciones que se describen en el diagrama de flujo de la figura 5.

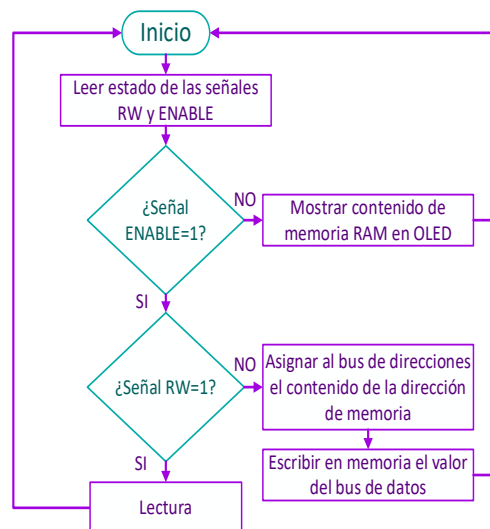


Figura 5 Ciclo de escritura de la memoria.

### Algoritmo del protocolo MESI

Al realizarse una petición de lectura, el algoritmo del protocolo para dos procesadores tiene un funcionamiento que se describe de la siguiente forma:

- Si el procesador que activa la lectura se encuentra en el estado 'I' y el otro procesador se encuentra en el estado 'I', se lee directamente el dato desde la memoria y el procesador que activó la lectura cambia su estado a 'E'.
- Si el procesador que activa la lectura se encuentra en el estado 'E' o 'M' y el otro procesador se encuentra en el estado 'I' se lee directamente el valor desde la caché y se mantiene en el mismo estado. El proceso anterior se repite si ambos procesadores se encuentran en el estado 'S'.
- Cuando el procesador que activa la lectura se encuentra en estado 'I' y el otro procesador se encuentra en el estado 'E', ambos pasan al estado 'S' y el procesador que activa la lectura lee los datos directamente de la caché del otro procesador.

- Cuando el procesador que activa la lectura se encuentra en estado 'I' y el otro procesador se encuentra en estado 'M', este último debe cambiar su estado a 'S', actualizar el dato en memoria y una vez que concluye, el primer procesador lee directamente desde la memoria y cambia su estado a 'S'.

La figura 6 presenta el diagrama de flujo que representa el proceso de petición de lectura.

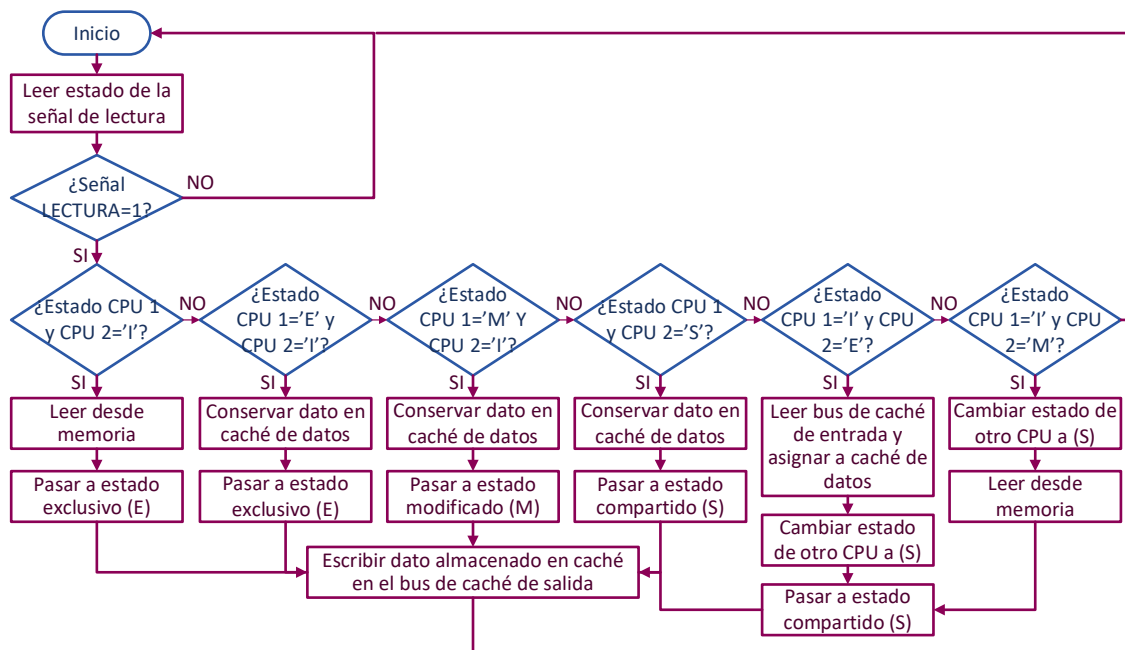


Figura 6 Diagrama de flujo que representa la petición de lectura.

Cuando la petición realizada es de escritura, el protocolo realiza lo siguiente:

- Si ambos procesadores se encuentran en el estado 'I', el procesador que activa la escritura lee el dato directamente desde memoria y una vez que lo tiene en su línea de caché lo modifica y cambia su estado en 'M'.
- Cuando el procesador que activa la escritura se encuentra en el estado 'E' o 'M' y el otro procesador se encuentra en el estado 'I', se modifica el valor directamente en la línea de caché y se mantienen en el mismo estado.
- Si ambos procesadores se encuentran en el estado 'S' además de realizar el proceso del punto anterior, el procesador que activa la escritura actualiza el

valor en memoria, éste cambia su estado a 'E' y cambia el estado del otro procesador a 'I'.

- Si el procesador que activa la escritura se encuentra en el estado 'I' y el otro procesador en el estado 'E' se debe leer el dato directamente desde la línea de caché, modificar el valor, actualizarlo en memoria y cambiar el estado a 'E', mientras que el otro procesador pasa al estado 'I'.
- Si el procesador que activa la escritura se encuentra en estado 'I' y el otro procesador se encuentra en estado 'M', este último debe actualizar el dato en memoria, el primer procesador lee directamente de la línea de caché y el resto de la secuencia del punto anterior se mantiene.

La figura 7 presenta el diagrama de flujo que representa la petición de escritura.

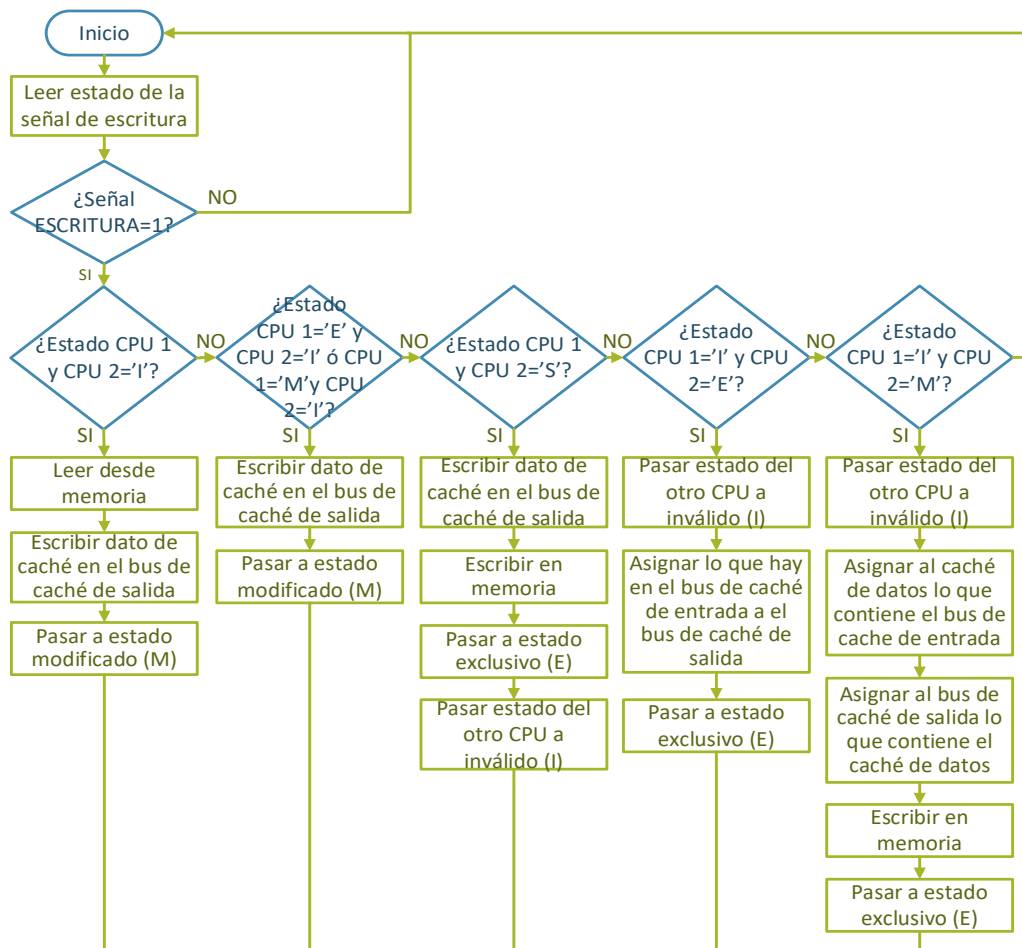


Figura 7 Diagrama de flujo que representa la petición de escritura.

### 3. Resultados

A continuación, se muestran los resultados de la implementación del protocolo MESI. En la figura 8 se observa cómo el prototipo muestra en las pantallas LCD los resultados de las operaciones de lectura y escritura que se realizan en la caché, así como el contenido de la memoria que se despliega en la pantalla OLED.

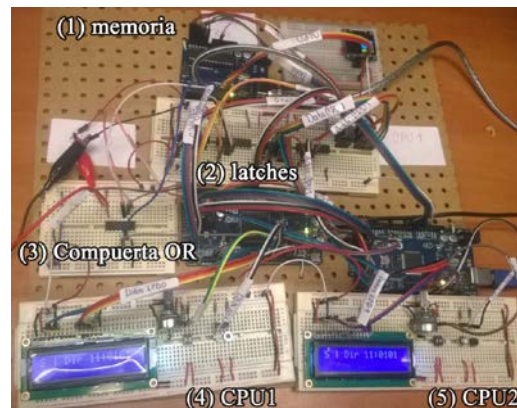


Figura 8 Prototipo ensamblado.

Para validar el funcionamiento de los algoritmos implementados, se realizaron pruebas aplicando las operaciones de lectura y escritura en ambos procesadores basados en ejemplos de la literatura utilizada [Arnau, 2012].

La primera prueba consistió en realizar las siguientes operaciones:

- EL CPU 2 realiza una solicitud de lectura a una dirección de memoria, por lo tanto, al iniciar ambos cachés en estado 'I' el CPU 2 debe leer directamente el valor de memoria y cambiar el estado a 'E'.
- El CPU 2 realiza una solicitud de escritura, por lo tanto, modifica el dato en caché que pasa al estado 'M'.
- El CPU 1 realiza una petición de lectura a la misma dirección, por lo cual los datos son proporcionados por la caché del CPU 2, pasando al estado 'S' el caché de ambos procesadores.
- El CPU 1 realiza la petición de escritura directamente en su caché, cambiando el estado a 'E' y pasando a 'I' el caché del procesador 2.
- El CPU 2 realiza la petición de lectura a la misma dirección, por lo que ambos cachés pasan al estado 'S'.



Se utilizaron las cuatro direcciones de memoria, además la secuencia se repitió en numerosas ocasiones, esto con la finalidad de verificar que los resultados obtenidos son correctos, dichos resultados se muestran en la tabla 2. La figura 9 presenta algunas imágenes de las pruebas.

Tabla 2 Resultados de las pruebas.

Operación	Origen de los datos	Caché CPU 1	Caché CPU 2	Datos	Dirección
P2:Read	Memoria	I	E	0000	11
P2:Write	Caché P2	I	M	0011	11
P1:Read	Caché P2	S	S	0011	11
P1:Write	Caché P1	E	I	0101	11
P2:Read	Caché P1	S	S	0101	11

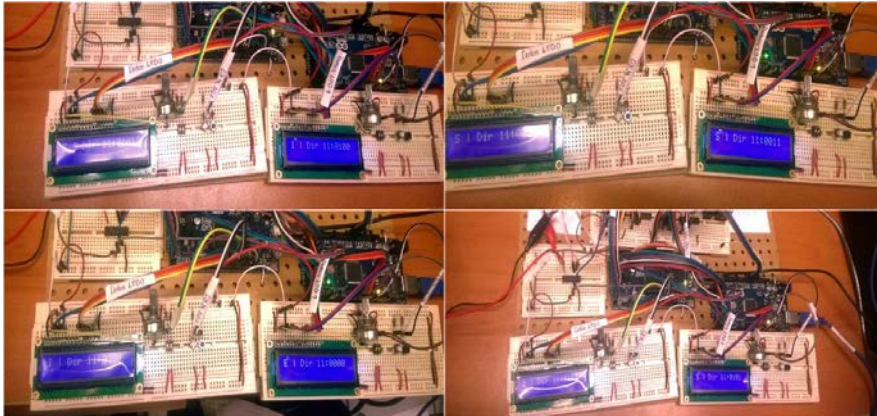


Figura 9 Imágenes de los resultados de las pruebas.

#### 4. Discusión

Durante el desarrollo del prototipo se presentaron diferentes problemas debido a la sincronización de la memoria con los procesadores. La falta de experiencia en el diseño provocó retraso en el desarrollo que se fue subsanando, por ejemplo, se recurrió al uso del sistema de interrupciones para que el funcionamiento de uno de los procesadores atendiera las peticiones donde se requiriera invalidar el estado de los demás CPU's, de tal forma que la cantidad de conexiones entre dispositivos aumentó.

Arduino es la base del desarrollo del prototipo, debido a que facilitó el desarrollo y permitió integrar varios componentes de manera sencilla. El objetivo era visualizar

el funcionamiento del protocolo MESI, observando en todo momento las transiciones, los estados en el que se encuentran las caches y los valores que hay en la memoria.

Como se observó en la sección anterior, las pruebas realizadas cumplen con los resultados que muestra la literatura. Por lo anterior se puede afirmar que el objetivo principal se alcanzó, ya que el prototipo muestra el funcionamiento del protocolo MESI. El prototipo puede ser un recurso de apoyo para cursos de arquitectura de computadoras a nivel licenciatura y maestría, debido al grado de sencillez con la que trabaja.

## **5. Conclusiones**

El protocolo MESI es una de las soluciones que existen para atacar el problema de la coherencia de caché. La dificultad de aprendizaje del protocolo se debe a la necesidad de recursos visuales que permitan al estudiante observar de forma visual los cambios de estado que ocurren, cuando uno o más procesadores requieren acceder a una misma dirección de memoria.

El desarrollo del prototipo permitió enfrentarse en un escenario real al problema de coherencia de caché y sincronización de multiprocesadores, ya que, cada Arduino que simula el funcionamiento de un microprocesador que trabaja de forma independiente, hace que ningún dispositivo tenga la certeza de las acciones que van a ocurrir, por lo que el algoritmo debe prever las posibles situaciones que puedan desencadenarse.

El desarrollo del prototipo implementado en placas Arduino disminuyó gran parte del trabajo, ya que debido a la gran cantidad de recursos que contiene y la facilidad para el manejo de dispositivos como las pantallas y los botones permitieron enfocar el trabajo en el desarrollo de la programación.

Como trabajo futuro se propone mejorar el diseño del prototipo de forma que se requieran menos conexiones, así como la integración de más de dos procesadores trabajando en conjunto y dos niveles de caché, además de considerar circuitos impresos para una estética más profesional.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Arduino. Arduino Products: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>.
- [2] Arnau, L. V. Organización de Computadores, Capítulo 5 Multiprocesadores, Universidad de Valencia, Marzo, 2012.
- [3] Dunning D. Tipos de RAM: estática y dinámica: [https://techlandia.com/tipos-ram-estatica-dinamica-info\\_290309/](https://techlandia.com/tipos-ram-estatica-dinamica-info_290309/).
- [4] Gómez Luna, J., Herruzo Gómez, E., Benavides Benítez, J. I. MESI Cache Coherence Simulator for Teaching Purposes. CLEI, 2009.
- [5] INTEL, Intel 64 and IA-32 architectures software developer's manual. Volume 1: Basic Architecture, Mayo 2018.
- [6] Jones, J. MESI cache coherency animation, Computer Architecture Animations. <https://www.scss.tcd.ie/Jeremy.Jones/vivio/caches/MESIHelp.htm>, 2018.
- [7] Kehagias, D., Raptis, I. An Interactive MESI Cache Coherence Simulator for Educational Purposes. Proceedings of the 20th Pan-Hellenic Conference on Informatics, 61, November, 2016.
- [8] Laguéns, A. A., Mir, S. B., Quintana Orti, E. S. An Interactive Animation for Learning How Cache Coherence Protocols Work. Proceedings of INTED2011 Conference, 7-9, March, 2011.
- [9] Mallya, N. B., Patil, G., Raveendran, B. Simulation based Performance Study of Cache Coherence Protocols. Nanoelectronic and Information Systems (iNIS), 2015 IEEE International Symposium, 125-130, December, 2015.
- [10] Papamarcos, M. S., and Patel, J. H. A low-overhead coherence solution for multiprocessors with private cache memories. 25 years of the international symposia on Computer architecture, 284-290, 1998.
- [11] Pimentel, C. J., Pérez, R. P, Rivera, Z. I. Programa de simulación del protocolo de coherencia MESI, Boletín UPIITA, Núm. 35, Enero, 2013.
- [12] Stallings, W. Computer organization and architecture: designing for performance, 8th Edition, Pearson Education, India, 2006.
- [13] Tanenbaum, A. S. Organización de computadoras: un enfoque estructurado, 4ta edición, Pearson education, México, 2000.

## **VIDEO PORTERO USANDO TARJETAS RASPBERRY PI 3**

### *VIDEO INTERCOM USING RASPBERRY PI 3 CARDS*

***José Ignacio Vega Luna***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Gerardo Salgado Guzmán***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Mario Alberto Lagos Acosta***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***Francisco Javier Sánchez Rangel***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

***José Francisco Cosme Aceves***

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

### **Resumen**

Se presenta el desarrollo de un video portero para edificios de oficinas integrado por un módulo maestro y tres módulos esclavos. El módulo maestro, instalado en la puerta del edificio, está compuesto por: una tarjeta Raspberry Pi, una cámara de video, una pantalla táctil, un micrófono USB y una bocina. Los módulos esclavos, instalados en las oficinas del edificio, están compuestos por: una tarjeta Raspberry Pi, una pantalla táctil, un micrófono USB y una bocina. Las funciones del video portero son: anunciar al visitante con un tono de timbre y comunicarlo con el residente a través de transmisión de audio y video en tiempo real, abrir la puerta y permitir al visitante registrar un mensaje. Se logró un alcance de 45 metros con línea de vista en la comunicación WiFi entre los módulos y el punto de acceso y un retraso máximo de la señal de video de 50 ms.

**Palabras Claves:** Micrófono USB, pantalla táctil, Raspberry Pi, video portero, WiFi.

## **Abstract**

*The development of a video intercom for office buildings is presented, composed of a master module and three slave modules. The master module, installed in the door of the building, is composed of: a Raspberry Pi card, a video camera, a touch screen, a USB microphone and a speaker. The slave modules, installed in the offices of the building, are composed of: a Raspberry Pi card, a touch screen, a USB microphone and a speaker. The functions of the video intercom are: announce the visitor with a ring tone and communicate it with the resident through audio and video transmission in real time, open the door and allow the visitor to register a message. A range of 45 meters was achieved with line of sight in the WiFi communication between the modules and the access point and a maximum delay of the 50 ms video signal.*

**Keywords:** *Raspberry Pi, touchscreen, USB microphone, video itercom, WiFi.*

## **1. Introducción**

Desde la aparición del interfono, los porteros electrónicos se han desarrollado a la par conforme avanza la tecnología, particularmente los sistemas digitales. En principio, los interfonos fueron analógicos y con pocas funciones. En la puerta de la vivienda o edificio estaba instalada una placa o panel con uno o varios botones, un micrófono, una bocina y una contrachapa eléctrica, mientras que en el interior se encontraba un timbre, una bocina, un micrófono y un interruptor para activar la contrachapa y abrir la puerta. Posteriormente, la bocina y micrófono fueron sustituidos por un auricular. A pesar de que los avances tecnológicos han propiciado cambios en este tipo de sistemas, sus funciones esenciales se han preservado: identificar la persona que intenta contactar al propietario, habilitar una conversación entre el propietario y visitante y automatizar el control del ingreso. Gracias al uso de estos sistemas, la seguridad y tranquilidad de viviendas y edificios de departamentos y oficinas ha aumentado considerablemente, ya que el propietario puede tomar la decisión de no abrir ante cualquier eventualidad o amenaza. El interfono ha evolucionado a lo que hoy se conoce como video portero. El video portero realiza las funciones de un interfono e incorpora cámaras de video y

pantallas táctiles, lo cual permite al propietario ver al visitante antes de entablar la conversación y permitirle o no la entrada, brindando un nivel adicional de seguridad y evitando situaciones incómodas, no deseadas o peligrosas [Myakala, 2017]. Con la gran explosión tecnológica de los últimos años, se han incorporado características estéticas y funciones a un video portero que han hecho que en la actualidad se tenga disponible una gran cantidad de modelos y proveedores y se conviertan en sistemas cada día más demandados y útiles. Algunos modelos integran una solución de circuito cerrado de televisión que permite grabar permanentemente lo que sucede en la puerta, otros cuentan con sensores de movimiento para activar el circuito cerrado de televisión. Otras funcionalidades incorporan: audio mejorado sin interferencias, cámaras de visión nocturna, cámaras angulares y de alta resolución, sensores de temperatura para el exterior, identificación del propietario y visitantes por medio de huellas digitales, tecnología Bluetooth y tarjetas RFID, adaptaciones para personas con capacidades diferentes, buzón de mensajes y conexión a la red de datos. Algunos video porteros realizan la conexión a la red de datos usando tecnología WiFi, permitiendo al usuario acceder remotamente al portero para hablar y ver al visitante y controlar la puerta desde la Internet usando una computadora o dispositivo móvil.

En este trabajo se presenta la implantación de un video portero realizado a petición de un edificio de oficinas. Se solicitó que el video portero realice las siguientes funciones: emitir un tono de timbre cuando una persona llama a la puerta, aceptar o rechazar la llamada en la oficina, entablar el dialogo entre el visitante y el residente, apertura de puerta, buzón de mensajes cuando el residente esté ausente y terminar el dialogo. Se solicitó además que el sistema use pantallas táctiles, tecnología WiFi, sea confiable y fácil de instalar y usar. Se acordó realizar un sistema piloto con tres oficinas y extender su instalación a 10 oficinas más después de probarlo y evaluarlo. Tomando en cuenta las funcionalidades y características anteriores, se propuso un video portero compuesto por un módulo maestro y tres módulos esclavos. El módulo maestro se instaló en un panel de la puerta de entrada del edificio y cada módulo esclavo en una de tres oficinas. Los dos tipos de módulos se construyeron en base a una tarjeta Raspberry Pi 3 B+ con sistema operativo

Raspbian. Uno de los puntos más importantes de este trabajo es la forma de implantar la transmisión de audio y video en tiempo real o streaming. Existen varias técnicas y procedimientos para realizar el streaming. Particularmente, Raspbian cuenta con varias herramientas y puede integrar funciones de biblioteca de software libre que se invocan desde un programa en Python para la captura y reproducción de audio y video. Una vez realizada la captura, puede utilizarse alguna técnica o herramienta para realizar el streaming desde Python en Raspbian, una de las más poderosas es ffmpeg. La herramienta ffmpeg es una colección de software libre que puede grabar, convertir, mezclar y realizar streaming usando una biblioteca de codecs incorporados. Con ffmpeg se obtienen los tiempos de latencia bajos, menos de 50 ms, es fácil de utilizar y genera programas sencillos. Otra alternativa para realizar streaming es usar un servidor de protocolo de streaming en tiempo real (RTSP-Real Time Streaming Protocol) en conjunto con una herramienta que genere el streaming, por ejemplo picamera. Existen bibliotecas de código libre para instalar y configurar un servidor RTSP en Raspbian. Lo único necesario es dirigir la captura de audio y video al servidor RTSP y éste procesará las solicitudes de streaming de los clientes a través de la red. A pesar de la facilidad de uso de este método, presenta algunos problemas de compatibilidad y comunicación con algunas versiones de sistemas operativos de clientes, sobre todo en dispositivos móviles [Banu, 2017]. La razón principal de usar la tarjeta Raspberry Pi en este trabajo fue porque existe una gran cantidad de aplicaciones y bibliotecas desarrolladas por la comunidad de código abierto para Raspbian de fácil instalación, configuración y uso. En lo que respecta a video porteros con arquitecturas similares a la del trabajo aquí presentado desarrollados los últimos años, la mayoría de ellos usan comunicación alámbrica a través de interfaces Ethernet. Por otro parte, la tecnología se está enfocando más en el desarrollo de sistemas de video vigilancia y algoritmos y técnicas más eficientes y seguras de streaming. Un sistema de video vigilancia transmite las señales de audio y video que capta de un área para su registro y análisis. Los sistemas de video vigilancia se han vuelto parte integral de monitoreo de la seguridad urbana y de diferentes tipos de instalaciones debido a la reducción del costo de cámaras de video y sensores para detección automática de eventos

[Konda, 2017]. Se han creado recientemente sistemas de video vigilancia basados en tarjetas Raspberry Pi-3 y cámaras USB para abrir remotamente desde la Internet la puerta de un edificio o vivienda [Myakala, 2017], no cuentan con las funcionalidades de un video portero como el realizado en este trabajo. Otros trabajos recientes en este campo se han concentrado en la creación de algoritmos más eficientes para la detección de movimiento, la segmentación de streaming y algoritmos de compresión H.264, usando vectores de movimiento y compresión algoritmos. Trabajos adicionales se han centrado en el análisis de ambientes complejos, escenarios urbanos y áreas donde se concentran multitudes, como por ejemplo aeropuertos y estaciones de trenes, realizando seguimiento de personas y monitoreo de actividad, incluyendo detección de objetos abandonados y vigilancia de puertas para detectar amenazas potenciales [Conci, 2016]. Varios trabajos recientes han tenido como objetivo llevar a cabo video vigilancia remota, desde dispositivos móviles, en hogares de adultos mayores y niños [Chang, 2016], combinando inclusive diferentes tipos de sensores y actuadores para detectar y evitar intrusos, robos, fuego y fugas de gas con tarjetas Raspberry Pi 3 [Joshi, 2017], inteligencia artificial [Arnold, 2014] y control de electrodomésticos para conformar soluciones de Internet de las Cosas (IoT-Internet Of Things) [Watanabe, 2013]. En lo que respecta a las últimas investigaciones referentes a streaming, se han desarrollado plataformas para transmisión de video de ultra alta definición (UHD) para aplicaciones complejas, como realidad aumentada, que dominaran el tráfico en la futura quinta generación (5G) de redes móviles [Nightingale, 2018]. Estas plataformas y los algoritmos usados se basan en vistas múltiples de cámaras de alta definición [Zhang, 2018], uso de tasas de bits adaptivas (ABR) y ranuras de tiempo derivativas [Zahran, 2018]. Otras investigaciones de este tipo consideran que el tráfico de la Internet se triplicará en 2021 y que un alto porcentaje del tráfico será video, por lo que proponen el uso de protocolos nuevos como el Protocolo de Streaming Dual Flexible (FDSP), el cual combina la confiabilidad de TCP y baja latencia de UDP. Analiza las partes críticas del video para transmitir las vía TCP y el resto vía UDP [Gatimu, 2018]. Tomando en cuenta lo anterior, las aportaciones del trabajo aquí presentado son:



- No es un sistema de video vigilancia que usa componentes de tecnología actual y compactos, así como software de código libre.
- Utiliza tecnología WiFi disponible actualmente en casi cualquier oficina u hogar, evitando modificar la construcción donde se instala.
- Las herramientas software usadas son las últimas versiones de su clase, permitiendo transmitir audio y video en tiempo real con mínima latencia en una red inalámbrica.

## 2. Métodos

La metodología seguida en el desarrollo de este sistema consistió de dos fases. La primera fase fue dividirlo en dos tipos de módulos: el módulo maestro y los módulos esclavos, como se muestra en la figura 1.



Figura 1 Diagrama funcional del sistema.

La segunda fase, la cual consistió en seleccionar los componentes adecuados con los cuales pudieran implantarse las funciones solicitadas. A continuación, se explica la arquitectura de los dos tipos de módulos y la funcionalidad del sistema.

### El módulo maestro

En la figura 2 se muestra la arquitectura del módulo maestro. Se utilizó una tarjeta de memoria SD de 16 GB en la tarjeta Raspberry para instalar el sistema operativo Raspbian kernel 4.9 y el buzón de mensajes. La pantalla táctil utilizada en el módulo maestro para implantar la interfaz de usuario fue el dispositivo Pi+TFT de 3.5", el

cual tiene una resolución de 480x320 y se conectó al puerto SPI de la tarjeta Raspberry Pi. La interfaz de usuario se realizó usando pygame. La herramienta pygame es un conjunto de bibliotecas que pueden usarse en un programa de Python para la implantación de videojuegos, programas multimedia e interfaces gráficas de usuario, ya que permite mostrar texto, imágenes y sonidos en una pantalla táctil y controlar la posición del cursor. Esta herramienta se instala por defecto con la versión de Raspbian para Raspberry Pi.

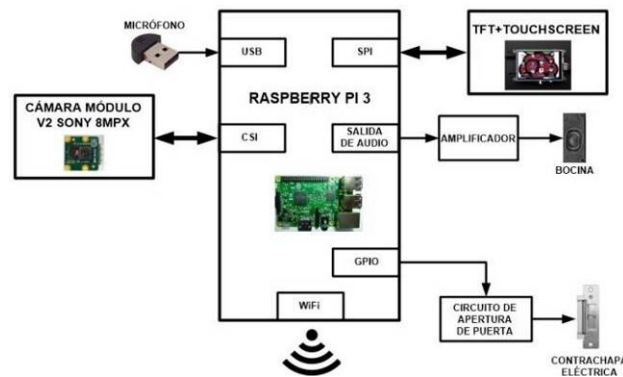


Figura 2 Arquitectura del módulo maestro.

La cámara de video del módulo maestro es el dispositivo denominado módulo de cámara para Raspberry V2 conectado a la interfaz CSI de la Raspberry Pi. La cámara de video cuenta con un sensor de alta resolución Sony IMX219 de 8 Megapíxeles. Permite capturar fotografías con una resolución máxima de 3238x2464 en formatos JPEG, GIF, BMP y PNG y video de alta definición. Existen bibliotecas de código abierto para usar la cámara y manipular fotos y video que pueden invocarse desde el shell de Raspbian o desde un programa en Python. La cámara puede controlarse usando el comando raspinstall, sin embargo, en este trabajo se utilizó la biblioteca python-picamera de Python en caso de que a futuro en el sistema sea necesario modificar las características de captura de video. La cámara se habilitó a través de la herramienta raspi-config de Raspbian y posteriormente se instaló la biblioteca python-picamera utilizando el comando: `sudo apt-get install python3-picamera`. El módulo maestro cuenta también con un micrófono mini USB el cual no necesita driver y se conectó a un puerto USB de la

Raspberry utilizando un cable de extensión USB para poder instalar el micrófono en el panel del video portero. El micrófono y la cámara de video tienen dos funciones: capturar las señales de audio y video del visitante para transmitir las por streaming al módulo esclavo y que el residente o persona en la oficina pueda ver y escuchar al visitante y permitirle registrar un mensaje cuando el residente se encuentre ausente. En sentido inverso, por seguridad el visitante solo puede escuchar al residente, no puede verlo en la pantalla táctil del módulo maestro. Para este fin, se conectó a la salida de audio de la Raspberry Pi un amplificador y un altavoz de 4  $\Omega$ . El amplificador clase D monoaural de 2.5 Watts empleado fue el dispositivo PAM8302. El módulo maestro puede activar el actuador de una contrachapa eléctrica por medio de un circuito conectado a una terminal GPIO configurada como salida. El programa que se ejecuta en el módulo maestro se realizó en Python 3.6 y realiza las siguientes funciones: inicializa temporizadores, la pantalla táctil, la cámara de video, la interfaz WiFi y la terminal GPIO, a continuación entra en un ciclo continuo donde explora cada 0.5 segundos la pantalla táctil. Cuando un visitante arriba a la puerta de entrada del edificio deberá tocar la pantalla. A continuación, se mostrará en la pantalla el mensaje de bienvenida y un menú de botones con el número de cada oficina. En el momento de seleccionar una oficina, el módulo maestro inicia la captura de audio y video y lo transmite por streaming al nodo esclavo correspondiente. El módulo maestro identifica a cada módulo esclavo a través de la dirección IP establecida en su interfaz WiFi. La comunicación entre el módulo maestro y los módulos esclavos se llevó a cabo usando intercambio de mensajes con sockets bajo el esquema cliente-servidor. El programa usa tres sockets a través de los puertos 5000, 5001 y 5002. El puerto 5000 es utilizado por el módulo maestro para transmitir por streaming el audio y video del visitante, el puerto 5001 es usado por el módulo esclavo para transmitir por streaming el audio del residente y el puerto 5002 es usado por el módulo esclavo para transmitir mensajes de respuesta y ordenes al módulo maestro. Posteriormente, el programa espera un mensaje por el puerto 5002. En caso de que el mensaje recibido sea "AUSENTE" muestra en la pantalla táctil un aviso indicando que el residente no se encuentra y solicita al visitante que registre un mensaje cuya duración no sea más

de 30 segundos. El mensaje es capturado por la cámara de video y el micrófono en un archivo con formato MP4 y es transmitido al módulo esclavo. Si el mensaje recibido del módulo esclavo es "CONTESTAR", indicará que el residente desea hablar con el visitante y el módulo maestro escucha por el puerto 5001 el streaming de audio transmitido por el módulo esclavo. Es este momento, se lleva a cabo la comunicación entre las dos personas. Acto seguido, el programa del módulo maestro espera un mensaje por el puerto 5002. Si el mensaje recibido es "ABRIR", indicará que el residente desea permitir el acceso al visitante y se activa el actuador de la contrachapa eléctrica para abrir la puerta. Si el mensaje es "TERMINAR", indicará que el residente desea terminar la comunicación con el visitante sin permitir el paso. En cualquiera de los casos, "ABRIR" o "TERMINAR", el programa cierra finalmente los puertos usados, apaga la pantalla táctil y retorna al inicio del ciclo para explorar la pantalla nuevamente. En la figura 3 se muestra el diagrama de flujo seguido para realizar la programación del módulo maestro. La forma como fueron implantadas las funciones del módulo maestro se explican a continuación.

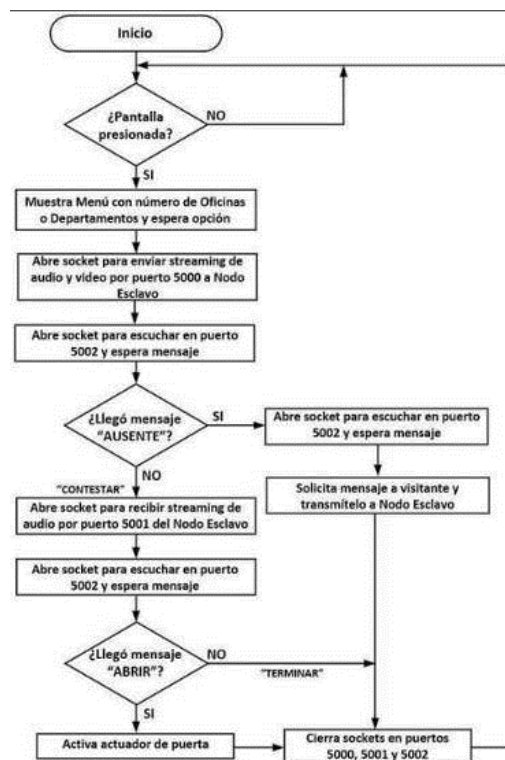


Figura 3 Diagrama de flujo del programa principal del módulo maestro.

Para configurar, reproducir el video y mostrar menús en la pantalla táctil se utilizaron las funciones de la biblioteca pygame para Python en Raspbian. Esta biblioteca se descargó desde el github: <https://bitbucket.org/pygame/pygame>. Para generar y transmitir el streaming de audio y video del módulo maestro a los módulos esclavos se usó la aplicación raspivid, las funciones de la biblioteca ffmpeg, el módulo de Python subprocess.Popen y la herramienta netcat. A continuación, se configuró la cámara usando las opciones por defecto: sin efectos especiales, modo de exposición y modo de balance de blanco en automático. Posteriormente, se instalaron las bibliotecas ffmpeg y netcat ejecutando los comandos siguientes: sudo apt-get install ffmpeg y sudo apt-get install netcat y finalmente se implantó el streaming mediante la siguiente secuencia de instrucciones:

```
cmd="raspivid -o - -t 0 -n -w 1280 -h 720 -fps 25 | ffmpeg -thread_queue_size 1024 -y -  
f h264 -framerate 25 -i - -thread_queue_size 512 -f alsa -ac 1 -i hw:1 -vcodec copy  
-acodec mp4"  
p_stream_av = subprocess.Popen(cmd, shell=True, stderr=subprocess.PIPE)  
p_stream_av | nc IP_Esclavo 5000
```

En la primera línea se ejecutó la instrucción raspivid para capturar el video en formato crudo H264, conocido como MPEG-4 parte 1, a 25 cuadros por segundo (fps-frames per second), entregándolo, por medio de una tubería, a la aplicación ffmpeg. La aplicación ffmeg toma desde la tubería el video, lo mezcla con la entrada de audio y lo convierte a un flujo de datos o stream en formato MP4. A pesar de que la cámara puede capturar video a una tasa máxima de 120 fps, se utilizó una tasa de 25 fps en la que el retraso o lag fue aceptable, menor a 50 ms.

En la segunda línea, se invoca al módulo de Python subprocess.Popen, el cual sirve para ejecutar un proceso externo e interactuar con el sistema operativo desde un programa en Python. En este caso el módulo subprocess.Popen ejecuta la primera de las tres líneas. En la tercera línea, el flujo de datos de la salida de la primera línea se entrega a la instrucción nc que pertenece a netcat. Netcat es una herramienta de red de software libre empleada para abrir puertos TCP/UDP y que un host se mantenga escuchando en esos puertos. Utilizando un puerto, netcat crea un socket para conectarse a un servidor o para que el host funcione como servidor,

en el primer caso transmite el flujo de datos de la entrada estándar de la instrucción nc por el socket, mientras que en el segundo caso envía por la salida estándar de la instrucción nc lo que recibe por el socket. De esta manera, la tercera línea crea un socket y se conecta al puerto 5000 del módulo esclavo para transmitir el streaming de audio y video que la instrucción nc recibe en su entrada estándar. Para reproducir el streaming de audio que recibe el módulo maestro de un módulo esclavo se usaron las herramientas omxplayer de Raspbian y netcat. El streaming de audio recibido se encuentra en formato MP3 y se reproduce mediante las instrucciones nc -l -p 5001 | omxplayer. La instrucción nc crea un socket usando el puerto 5001 de tal forma que el host trabaja como servidor y se mantiene a la escucha de un cliente en ese puerto. Cuando el cliente se conecta al puerto 5001, la instrucción nc envía a la herramienta omxplayer lo que recibe por el socket. El streaming de audio se reproduce en la bocina conectada a la salida de audio de la tarjeta Raspberry. Por último, para generar el archivo de audio y video que almacena el mensaje del visitante cuando el residente está ausente, se usó un procedimiento similar al utilizado para generar el streaming de audio y video, solo que, en lugar de transmitirlo al módulo esclavo a través de un socket, el audio y video se almacenaron en un archivo que se transmite al módulo esclavo para que éste último lo almacene en el buzón de mensajes.

### **Los módulos esclavos**

Se construyeron tres módulos esclavos, todos con la misma arquitectura como la mostrada en la figura 4. En estos módulos se empleó una tarjeta Raspberry Pi 3 B+, una pantalla táctil Pi+TFT de 3.5" conectada al puerto SPI de la tarjeta Raspberry Pi, un micrófono mini USB conectado a un puerto USB de la Raspberry y un altavoz de 4  $\Omega$  conectado a la salida de audio de la Raspberry Pi por medio de un amplificador PAM8302.

Al mismo tiempo que el programa principal ejecuta el programa Escucha Módulo Maestro, explora si el residente toca la pantalla táctil. Al tocar la pantalla, el programa invoca la rutina Buzón de Mensajes. Esta rutina permite al residente ver los mensajes del buzón, escucharlos o eliminarlos. El buzón de mensajes se

almacena en la memoria SD de la tarjeta Raspberry. Al salir del buzón de mensajes el programa principal apaga la pantalla táctil después de 60 segundos.

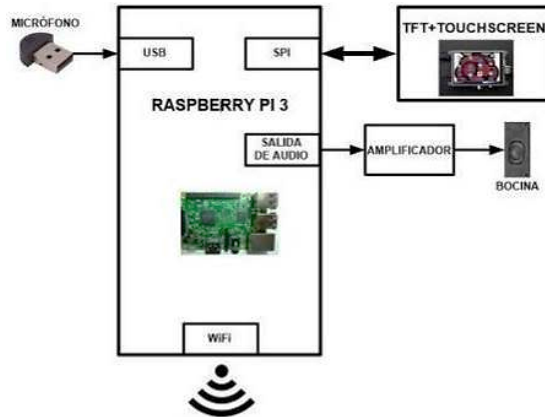


Figura 4 Arquitectura de los módulos esclavos.

En la figura 5 se muestra el diagrama de flujo del programa principal de los módulos esclavos.

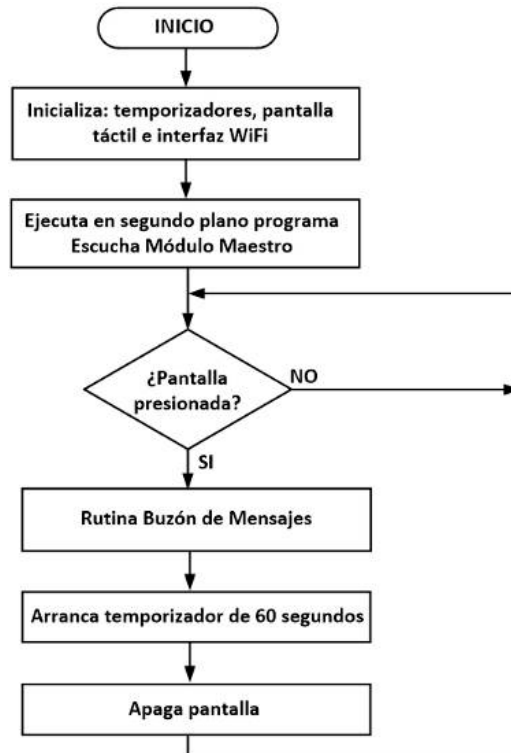


Figura 5 Diagrama de flujo del programa principal de los módulos esclavos

El programa Escucha Módulo Maestro inicia abriendo un socket usando el puerto 5000. Por medio de este puerto el módulo esclavo recibe, desde el módulo maestro, el streaming de audio y video que reproduce en la pantalla y en la bocina vía el amplificador cuando un visitante desea hablar con el residente. Al mismo tiempo, esta rutina reproduce un tono de timbre en la bocina, muestra en la pantalla el botón “CONTESTAR” y espera la respuesta del residente. Si el residente presiona el botón “CONTESTAR” se invoca la rutina Contestar, la cual se encarga de establecer y mantener la comunicación entre el visitante y el residente. Si el residente no presiona el botón “CONTESTAR” después de 5 tonos de timbre, el programa Escucha Módulo Maestro, termina la transmisión del streaming de audio, cierra el socket del puerto 5001 y transmite el mensaje “AUSENTE” al módulo maestro por el puerto 5002. El mensaje “AUSENTE” puede transmitirse aún en el caso que el residente se encuentre en la oficina y no presione el botón “CONTESTAR”, tal vez porque una vez que observó al visitante no desea abrir la puerta.

Después de transmitir el mensaje “AUSENTE”, el programa Escucha Módulo Maestro invoca la rutina Almacena Mensaje, la cual espera la recepción del archivo, con formato MP4, transmitido por el módulo maestro. Este archivo es el mensaje registrado por el visitante y es almacenado en el buzón. El programa Escucha Módulo Maestro termina apagando la pantalla después de 60 segundos, como se indica en el diagrama de flujo de la figura 6. En la figura 7 se indican las acciones realizadas por la rutina Contestar. Esta rutina inicia transmitiendo al módulo maestro el mensaje “CONTESTAR” usando el puerto 5002 y el streaming de audio que captura en el micrófono por el puerto 5001. Posteriormente, la rutina muestra en la pantalla táctil los botones “ABRIR” y “TERMINAR”. Mediante estos botones el residente puede indicar si desea abrir la puerta o terminar la comunicación con el visitante. Si el residente presiona el botón “ABRIR”, la rutina Contestar transmite, por el puerto 5002 al módulo maestro, el mensaje “ABRIR”. Después de presionar cualquiera de los dos botones anteriores, la rutina Contestar termina cerrando los sockets de los puertos 5000, 5001 y 5002 y apaga la pantalla después de 60 segundos. La forma como fueron implantadas las funciones de módulos esclavos



fue similar a la seguida en el módulo maestro. Para configurar, reproducir video y mostrar menús en pantalla táctil se utilizaron las funciones de biblioteca pygame.

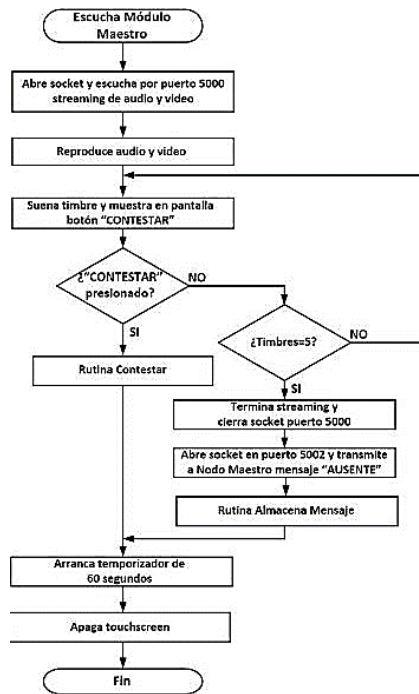


Figura 6 Diagrama de flujo del programa escucha módulo maestro.

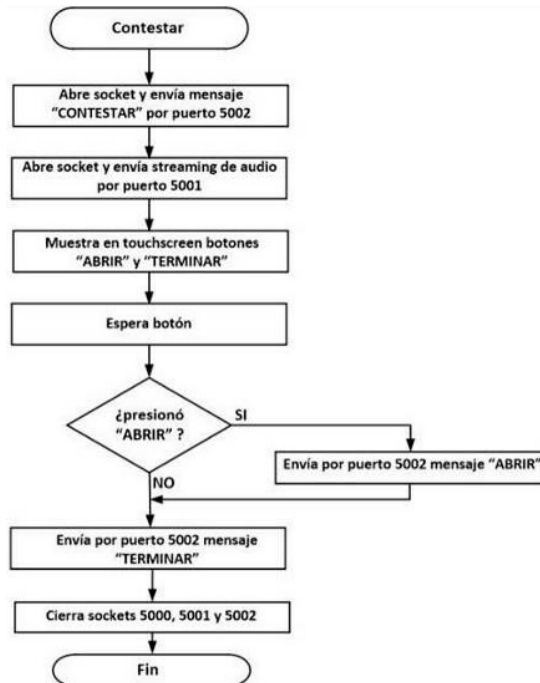


Figura 7 Diagrama de flujo de la rutina contestar.

Para generar y transmitir el streaming de audio en formato MP3 de este módulo al módulo maestro se usó la biblioteca ffmpeg, el módulo de Python subprocess.Popen y la herramienta netcat a través de la siguiente secuencia de instrucciones:

```
cmd="ffmpeg -thread_queue_size 1024 -y -i - -thread_queue_size 512 -f alsa -ac 1 -i  
hw:1 -vcodec copy -acodec mp3"  
p_stream_a = subprocess.Popen(cmd, shell=True, stderr=subprocess.PIPE)  
p_stream_a | nc IP_Maestro 5001
```

El flujo de datos en formato MP3 se envía a la entrada estándar de la instrucción nc. La instrucción nc de la tercera línea crea un socket y se conecta al puerto 5001 del módulo maestro para transmitir el streaming que recibe en su entrada estándar.

### **3. Resultados**

Antes de realizar las pruebas al sistema, se llevaron a cabo los siguientes ajustes al sistema:

- En la configuración de la cámara de video se estableció la nitidez a 15, el contraste a 25 y la brillantez a 45 ya que las imágenes se mostraban demasiado claras y no se podía distinguir el rostro de las personas.
- Se estableció la rotación de la pantalla táctil a modo horizontal, o paisaje, modificando el parámetro `fbtft_device.rotate=90` en el archivo `/boot/cmdline.txt`.
- Usando el potenciómetro del amplificador de audio del módulo maestro se aumentó el volumen de la bocina ya que en el exterior el audio resultaba muy bajo usando la ganancia por defecto de 24 dB.

A continuación, se procedió a ejecutar cuatro grupos de pruebas. El primer grupo de pruebas tuvo como objetivo determinar la cantidad de espacio usada por el archivo generado al registrar un visitante un mensaje de 30 segundos en el buzón localizado en la memoria SD de la Raspberry de un módulo esclavo. Para llevar a cabo estas pruebas se generaron mensajes de 30 diferentes personas, usando en la captura de video 50 fps. El tamaño del archivo resultante fue de 10 MB en

promedio. Considerando que la capacidad de la memoria SD son 16 GB y el espacio usado por el sistema operativo Raspbian y bibliotecas utilizan 3.6 GB, restan más de 12 GB para el buzón de mensajes. El segundo grupo de pruebas tuvo como objetivo medir el alcance de la transmisión WiFi de los módulos esclavos. El punto de acceso WiFi Cisco WAP4410N está instalado en la planta baja del edificio, localizado a 4 metros del módulo maestro y con línea de vista. Para efectuar estas pruebas se ubicó un módulo esclavo en diferentes niveles y departamentos del edificio, a diferentes distancias del punto de acceso y con línea de vista. A continuación, se ejecutaron dos programas en el nodo: uno de ellos en segundo plano, su función fue transmitir continuamente un archivo al módulo maestro y el segundo programa ejecutó el comando iwconfig para registrar la velocidad de transmisión y nivel de la potencia de la señal WiFi recibida (RSSI-Received Signal Strength Indicator) desde el punto de acceso a cada lugar donde se ubicó el módulo esclavo. Los resultados indicaron que el alcance fueron 45 metros aproximadamente a una velocidad de 290 Mbps, un poco menor a los 300 Mbps que pueden lograrse teóricamente usando el estándar 802.11n. La distancia que existe entre el punto de acceso y la tercera planta del edificio son 30 metros. A una distancia mayor a 45 metros la potencia decreció aceleradamente y se perdió el enlace cuando el nivel cayó a los -83 dBm como se muestra en gráfica de figura 8.

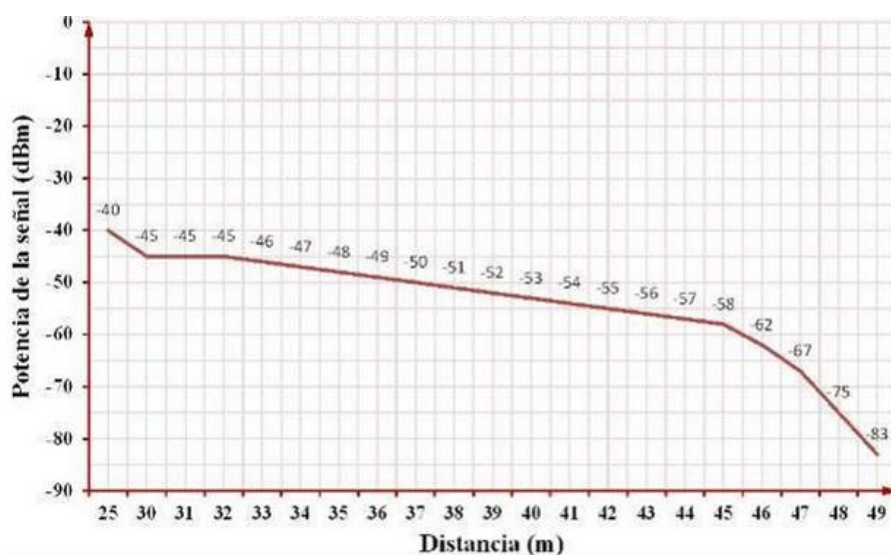


Figura 8 Alcance de la transmisión WiFi del sistema.

Adicionalmente, para verificar que el nivel de potencia reportado por el comando iwconfig fuera correcto, en cada punto donde se ubicó el módulo esclavo se colocó una computadora portátil para medir el nivel de RSSI utilizando la herramienta inSSIDer. Los valores de RSSI medidos con inSSIDer no tuvieron gran diferencia respecto a los indicados por el comando iwconfig. El tercer grupo de pruebas tuvo como objetivo determinar el tiempo de retraso en la transmisión de audio y video entre el módulo maestro y un módulo esclavo. En estas pruebas se tomaron las siguientes consideraciones:

- La velocidad entre los módulos esclavos y el punto de acceso es en promedio 280 Mbps.
- La captura de video se hizo con 50 fps. Antes de realizar estas pruebas se sincronizó el reloj de los módulos, usando el protocolo de tiempo de red (NTP-Network Time Protocol) y el servidor NTP maestro 3.north-america.pool.ntp.org.

A continuación, en el módulo esclavo se ejecutó un programa que abrió un socket, configuró al módulo como servidor usando netcat, esperó la recepción de audio y video desde el módulo maestro y registro la hora de inicio de la recepción. En el módulo maestro se ejecutó un programa que abrió un socket, configuró al módulo como cliente, transmitió el audio y video al módulo esclavo y registro la hora de inicio de la transmisión. Esta prueba se repitió 30 ocasiones, resultando un tiempo de retraso entre la transmisión y recepción de 50 ms en promedio, bastante aceptable, sin percibirse congelamiento en los cuadros del video mostrados en la pantalla TFT. El último grupo de pruebas tuvo como objetivo determinar el impacto de la cantidad de cuadros por segundo, usados en la captura de la señal de video, en el retardo de la señal transmitida entre los módulos. Se siguió el mismo procedimiento del grupo de pruebas anterior y en cada transmisión se modificó el parámetro de captura de cuadros por segundo. El valor inicial usado fue 20 fps, incrementándose hasta el máximo soportado por la cámara de video de 120 fps. Se observó que el retardo en la transmisión fue 40 ms entre 20 y 40 fps y entre 40 y 60 fps el retardo fue 50 ms. Para valores mayores a 50 fps el retardo en promedio

resultante fue 52 ms, como se muestra en la gráfica de la figura 9. En base a los resultados anteriores se consideró usar 50 fps en este trabajo.

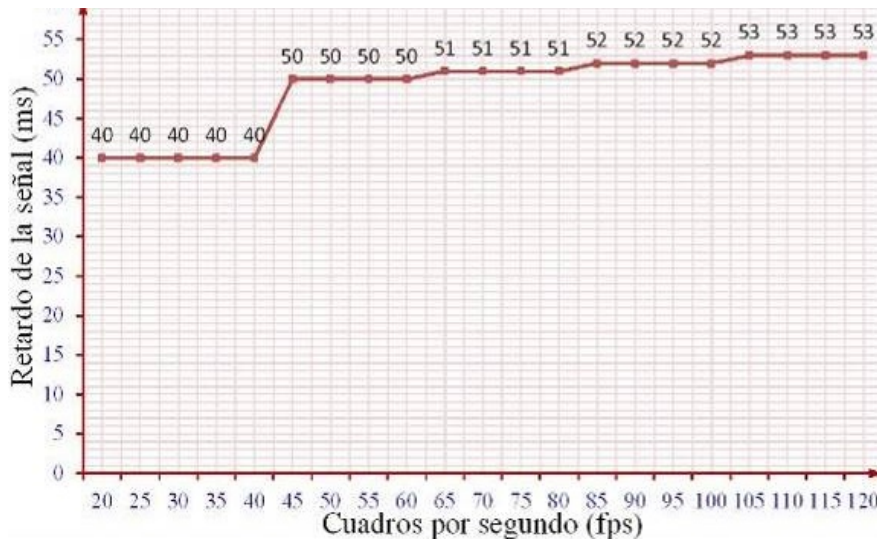


Figura 9 Impacto de fps en el tiempo de retardo de la transmisión de video.

#### 4. Discusión

Se obtuvo como resultado un video portero basado en tarjetas Raspberry Pi 3 B+ que cumple con las funciones solicitadas y las especificaciones requeridas: confiable y fácil de instalar y usar. El costo aproximado del módulo maestro es \$70 USD y el del módulo esclavo \$50 USD, \$120 USD en total. El costo de video porteros actualmente disponibles en el mercado con características similares al desarrollado en este trabajo es en promedio \$250 USD. Se contempló inicialmente usar en este sistema una cámara web en lugar de la cámara para Raspberry V2 pero se descartó la idea por las siguientes razones: A) El costo de la cámara web más económica es casi tres veces el costo de la cámara de video usada en este trabajo, B) Los responsables del edificio no aceptaron la idea porque restaba privacidad a cada oficina, cualquier residente podría ver los mensajes que los visitantes estarían registrando para un residente y C) Se necesitaría un disco duro o de estado sólido para almacenar el audio y video que permanentemente registra la cámara web. El incluir la cámara web no está mal ni de más, incorpora funcionalidades, pero el costo del sistema aumenta y debe aprobarse por el usuario.

## **5. Conclusiones**

El sistema construido fue probado y evaluado y, considerando los resultados obtenidos, se ha solicitado extender su operación a 7 oficinas adicionales y realizar una segunda versión que incorpore las siguientes funcionalidades:

- Un servidor web en los módulos esclavos para poder consultar desde la Internet el buzón de mensajes, comunicarse con el visitante y abrir remotamente la puerta.
- Un lector de huellas digitales en el módulo maestro que permita a personas registradas abrir la puerta.
- Un mecanismo de respaldo del buzón de mensajes.

Finalmente, el video portero desarrollado no fue solo una investigación ni un experimento ya actualmente se usa y resuelve una necesidad concreta.

## **6. Referencias**

- [1] Arnold, O., Kirsch, L. & Schulz, A. An interactive concierge for independent living. IEEE 3rd Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) Proceedings. Tokyo, Japan. Oct., 2014.
- [2] Banu, V. C., Costea, I. M. & Nemptanu, F. C. Intelligent video surveillance system. IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME) Proceedings. Constanta, Romania. Oct., 2017.
- [3] Chang, K. C., Liu, P. K. & Yu, C. S. Design of real-time video streaming and object tracking system for home care services. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW) Proceedings. Nantou, Taiwan. May, 2016.
- [4] Conci, N., De Natale, F. G. & Messelodi, S. An integrated framework for video surveillance in complex environments. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2) Proceedings. Trento, Italy. Sept., 2016.
- [5] Gatimu, K., Dhamodaran, A. & Johnson, T. Experimental study of low-latency HD VoD streaming using flexible dual TCP-UDP streaming protocol. 15th

- IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) Proceedings. Las Vegas, NV, USA. Jan., 2018.
- [6] Joshi, N. B. & Nalbalwar, S. L. A fall detection and alert system for an elderly using computer vision and Internet of Things. 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT) Proceedings. Bangalore, India. May, 2017.
- [7] Konda, K. R., Tefera, Y. T. & Conci, N. Real-time moving object detection and segmentation in H.264 video streams. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB) Proceedings. Cagliari, Italy. June, 2017.
- [8] Myakala, P. R., Nalumachu, R. & Sharma, S. A low cost intelligent smart system for real time infant monitoring and cry detection. TENCON 2017-IEEE Region 10 Conference Proceedings. Penang, Malaysia. Nov., 2017.
- [9] Nightingale, J., Salva-Garcia, P. & Alcaraz Calero, J. M. 5G-QoE: QoE Modelling for Ultra-HD Video Streaming in 5G Networks. IEEE Transactions on Broadcasting. (Early Access), 2018.
- [10] Quadri, S. A. & Sathish, P. IoT based home automation and surveillance system. International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS) Proceedings. Madurai, India. June, 2017.
- [11] Watanabe, T., Mochizuki, R. & Kobayashi, T. HACCS: Home Appliance Control Concierge System: Extending Functions on Web Service. IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference Proceedings. Kyoto, Japan. July, 2013.
- [12] Zahran, A. H., Raca, D. & Sreenan, C. ARBITER+: Adaptive Rate-Based InTElligent HTTP StReaming Algorithm for Mobile Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing. (Early Access), April, 2018.
- [13] Zhang, X., Toni, L. & Frossard, P. Adaptive Streaming in Interactive Multiview Video Systems. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology. (Early Access), March, 2018.

# **ACCESO A UN CENTRO DE DATOS UTILIZANDO UNA TARJETA RFID Y HUELLA DIGITAL**

## **ACCESS TO A DATA CENTER USING A RFID CARD AND THE FINGERPRINT**

**José Ignacio Vega Luna**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

**Mario Alberto Lagos Acosta**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

**Francisco Javier Sánchez Rangel**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

**José Francisco Cosme Aceves**

Universidad Autónoma Metropolitana  
*vlji@correo.azc.uam.mx*

### **Resumen**

Se presenta un sistema cuyo propósito es permitir el acceso a usuarios registrados en una base de datos a cinco áreas de un centro de datos. El problema a resolver es identificar a los usuarios a través de una tarjeta RFID y la huella digital para determinar si pueden entrar al área que intentan acceder. El diseño está compuesto por un módulo de control y cinco módulos de acceso. Los dos tipos de módulos se componen de una tarjeta Raspberry Pi 3, un lector de tarjetas RFID y un lector de huellas digitales. La información de usuarios se almacena en una base de datos MySQL y las huellas digitales en la memoria del lector de huellas del módulo de control. Se logró un alcance de 50 metros con línea de vista en la comunicación WiFi entre los módulos y un punto de acceso y un porcentaje de confiabilidad de 99.5%.

**Palabras Claves:** Lector de huellas digitales, MySQL, Raspberry Pi 3, RFID, Wi-Fi.



## **Abstract**

*A system is presented whose purpose is to allow access to registered users in a database to five areas of a data center. The problem to solve is to identify the users through an RFID card and the fingerprint to determine if they can enter the area they are trying to access. The design consists of a control module and five access modules. The two types of modules are composed of a Raspberry Pi 3 card, an RFID card reader and a fingerprint reader. The user information is stored in a MySQL database and the fingerprints in the memory of the fingerprint reader of the control module. A range of 50 meters was achieved with line of sight in the WiFi communication between the modules and an access point and a trust percentage of 99.5%.*

**Keywords:** *Fingerprint reader, MySQL, Raspberry Pi 3, RFID, Wi-Fi.*

## **1. Introducción**

Hoy en día, casi todas las organizaciones cuentan con un centro de datos o hacen uso de los servicios que ofrecen empresas propietarias de centros de datos. En un centro de datos se encuentran instalados equipos de cómputo, almacenamiento de información y telecomunicaciones utilizadas en las operaciones cotidianas de empresas e instituciones. Entre los mecanismos y procesos de acceso y seguridad en un centro de datos se encuentran los siguientes: sistemas de video vigilancia, torniquetes, puertas blindadas y herméticas, cerraduras electromagnéticas y detectores de movimiento, entre otros [Lima, 2017]. Los centros de datos se dividen en áreas denominadas bunkers. El acceso a un bunker solo está autorizado al personal de la empresa propietaria del equipo y al personal específico del centro de datos.

### **Presentación del problema a resolver**

Este trabajo se realizó a solicitud de una empresa que ofrece servicios de alojamiento, instalación y administración de equipo en centros de datos. El objetivo planteado fue contar con un sistema de identificación de usuarios utilizando tarjetas RFID (Radio Frequency Identification) y un lector de huellas digitales para controlar

el acceso a los bunkers. Se solicitó un sistema confiable, seguro y de respuesta rápida que no requiera la instalación de cableado adicional y use para la comunicación un punto de acceso WiFi del centro de datos.

Se requirió el uso de tarjetas RFID por ser económicas y fáciles de usar y un lector de huella digital como mecanismo adicional de seguridad. La distancia máxima de un bunker a la oficina de monitoreo del centro de datos son 35 metros.

La solución propuesta fue un sistema integrado por un módulo de control y cinco módulos de acceso. El módulo de control se instaló en la oficina de monitoreo y un módulo de acceso en la puerta principal y en las puertas de los bunkers. Ambos tipos de módulos cuentan con un lector de tarjetas RFID, un lector de huellas digitales y una tarjeta Raspberry Pi 3. Adicionalmente, el módulo de control cuenta con una pantalla táctil para implantar la interfaz de usuario.

A través de la interfaz de usuario el administrador del sistema puede dar de alta, remover o realizar cambios de usuarios. La información del usuario se almacena en una base de datos creada en el módulo de control y las imágenes de las huellas digitales se almacenan en la memoria flash del lector de huellas de este módulo. Los módulos de acceso tienen una copia de la base de datos y de las imágenes de las huellas digitales del módulo de control. Cuando el administrador del sistema realiza un cambio en la base de datos del módulo de control, éste transmite a los módulos de acceso el registro del usuario nuevo, removido o modificado y, si es necesario, la imagen de la huella digital correspondiente.

Con este mecanismo de funcionamiento se tiene un esquema similar a una base de datos distribuida. De tal forma que los módulos de acceso leen la tarjeta RFID y huella digital de los usuarios que intentan acceder al bunker, validan esta información localmente y activan el actuador de la puerta correspondiente cuando el usuario está autorizado a acceder.

### **Descripción de la tecnología usada**

La aplicación desarrollada en este trabajo utiliza, como primer mecanismo de seguridad, un lector de tarjetas RFID conectado a una tarjeta Raspberry Pi para acceder la información de las tarjetas RFID de los usuarios.

La tecnología NFC (Near Field Communication) surgió por la combinación de la tecnología RFID y las tarjetas inteligentes. Permite la identificación y caracterización de personas u objetos sin contacto físico usando las ondas de radio transmitidas por una etiqueta, permitiendo el intercambio de información entre objetos ubicados cerca uno del otro. La comunicación con NFC es más segura que otras tecnologías ya que el transmisor y receptor están estrechamente acoplados y próximos, con una cercanía máxima de 10 centímetros, sin necesidad de ejecutar una aplicación.

El segundo mecanismo de seguridad implantado en este trabajo fue de tipo biométrico identificando la huella digital del usuario.

Actualmente, bastantes sistemas de control de acceso biométrico usan lectores de huellas digitales, ya que proporcionan un mecanismo de identificación sencillo y confiable.

La mayoría de estos lectores integran un sensor óptico y un procesador digital de señales para capturar la imagen de la huella digital de una persona. La imagen es caracterizada en un buffer y convertida a una plantilla. La plantilla es una caracterización general de la huella digital. Una vez creada la plantilla, se almacena en la memoria flash del lector asignándole un identificador (ID).

El ID de la plantilla se usa para su búsqueda, remoción o comparación con otra plantilla. Adicionalmente, desde un controlador externo se puede cargar o descargar una plantilla de la memoria flash del lector. La memoria flash funciona similar a una base de datos de imágenes.

Aunque fue un requisito en la implantación de este trabajo usar tarjetas RFID y la huella digital como mecanismos de identidad, se exploraron tecnologías alternas de bajo costo y de respuesta rápida para la identificación de usuarios como los códigos QR (Quick Response) y el sistema iBeacon.

### **Trabajos relacionados**

Los códigos QR almacenan información en matrices de puntos o códigos de barras de forma bidimensional [Dudheria, 2017]. Cuando un dispositivo móvil lee un código QR ejecuta una aplicación para realizar una acción específica. En la implantación de este trabajo pudo usarse una combinación de tecnología RFID y

códigos QR pero resultaría un sistema poco más costoso y lento, ya que además de usar un método de impresión del código QR en las tarjetas RFID, éstas no podrían re-utilizarse [Zhang, 2017].

Por otra parte, iBeacon es un protocolo usado en sistemas de posicionamiento en interiores patentado por Apple Inc. [Srinivasan, 2016]. Está basado en transmisores de bajo costo y bajo consumo de energía que indican su presencia a un dispositivo con sistema operativo iOS y algunos dispositivos con sistema operativo Android. Existen proveedores de transmisores, llamados beacons, compatibles con iBeacon. Los beacons usan transmisores de tecnología Bluetooth de bajo consumo de energía, o Bluetooth 4.0, los cuales transmiten su identificador único universal (UUID) a dispositivos electrónicos móviles, permitiendo que un teléfono móvil o tableta ejecute una acción o aplicación basada en la ubicación del beacon al recibir la identificación, o dar seguimiento a clientes o usuarios de beacons [Burzacca, 2014]. Pudo haber sido una opción usar iBeacon en el desarrollo de este trabajo, lo cual implicaría usar un beacon como identificador del usuario y un dispositivo con iOS en cada punto de acceso al centro de datos, lo que aumentaría la complejidad en el uso, instalación y costo del sistema. Se han realizado trabajos de sistemas de acceso a instalaciones basados en Arduino, tarjetas RFID, lectores de huellas digitales y bases de datos MySQL, usando comunicación Ethernet a la base de datos, más rápida con respecto a WiFi. En este trabajo se requirió el uso de una tecnología inalámbrica no intrusiva a las instalaciones del centro de datos como WiFi [Palencia, 2015]. Se han llevado a cabo diversos trabajos que utilizan códigos QR o una combinación de éstos con tarjetas RFID [Wang, 2017] para controlar el acceso a instalaciones, para sistemas de localización y navegación y para identificación de productos e imágenes médicas [Kavitha, 2017]. Inclusive, se han realizado sistemas de acceso a centros de datos combinando códigos QR y marcas de agua [Pramkeaw, 2016]. El uso de códigos QR proporciona un nivel de seguridad más alto que las tarjetas RFID, pero el costo de implantación y operación de estos sistemas es elevado, ya que una vez usada una tarjeta con un código QR no puede utilizarse para otro usuario y el hardware de impresión y lectura de códigos QR es de más alto precio que un lector NFC [Lay, 2017].

Por otro lado, se ha realizado una gran variedad de sistemas de acceso a centros de datos a través de dispositivos biométricos. Algunos de estos sistemas llevan a cabo reconocimiento facial y otros leen el iris del usuario o movimiento del ojo usando un lector instalado en la puerta de acceso [Addy, 2016] o por medio del teléfono inteligente del usuario [Derawi, 2012]. Estos sistemas son más seguros que los que usan tarjetas RFID o códigos QR con un lector de huellas digitales, pero su costo de implantación es mucho más alto.

La aportación del sistema construido en este trabajo es que cuenta con dos mecanismos de identificación: la lectura del UUID de la tarjeta RFID y la lectura biométrica de la huella digital del usuario. Adicionalmente, se utilizan componentes de reciente tecnología, donde todo el software es de código abierto y la comunicación es a través de WiFi, la cual no impacta en las instalaciones del centro de datos, llevando a cabo una aplicación práctica que cumple con los requisitos solicitados por el usuario.

## **2. Métodos**

La funcionalidad del sistema consiste almacenar la información de los usuarios en una base de datos y las huellas digitales en la memoria del lector de huellas del módulo ubicado en la oficina de monitoreo del centro de datos y replicar esta información a los cinco módulos ubicados en la puerta de acceso de cada una de las áreas del centro de datos, como se indica en la figura 1. La comunicación entre los módulos del sistema es a través de un punto de acceso WiFi instalado en el centro de datos. Tomando en cuenta lo anterior, la metodología seguida para el desarrollo del sistema consistió en dividirlo en dos tipos de módulos, el módulo de control y los módulos de acceso. Posteriormente, cada tipo de módulo fue diseñado e implantado seleccionando los componentes adecuados para realizar su función. Un componente fundamental de los módulos es la tarjeta Raspberry Pi 3. Se optó por usar esta tarjeta cuyo costo es mayor a otras de su tipo, como por ejemplo la Arduino, por dos razones:

- El sistema operativo Raspbian, similar a casi todas las distribuciones de Linux, incorpora Python. Esto representa la ventaja tecnológica de poder

utilizar una gran cantidad de bibliotecas para Python, a través de la comunidad de software libre, que permiten la creación segura, rápida y eficiente de aplicaciones

- La Raspberry Pi cuenta con interfaz WiFi y una mayor cantidad de recursos hardware que otras, como por ejemplo más puertos serie e interfaz para memoria SD, siendo una computadora real que permite la posibilidad de crecer las aplicaciones como la aquí presentada.

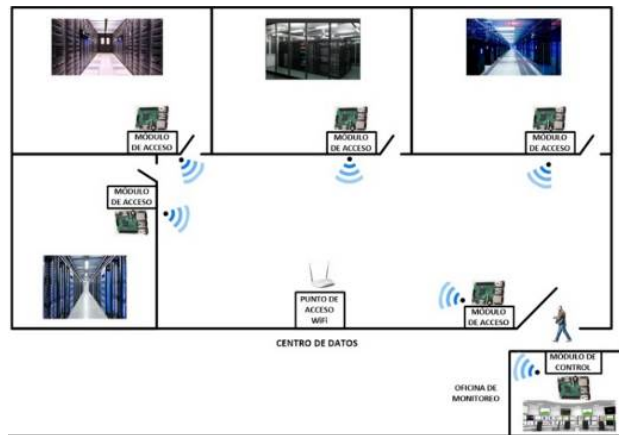


Figura 1 Funcionalidad del sistema desarrollado.

### El módulo de control

El módulo de control está compuesto por: una tarjeta Raspberry Pi 3 B+, un lector de tarjetas RFiD, un lector de huellas digitales y una pantalla sensible al tacto, como se muestra en la arquitectura del módulo de la figura 2.

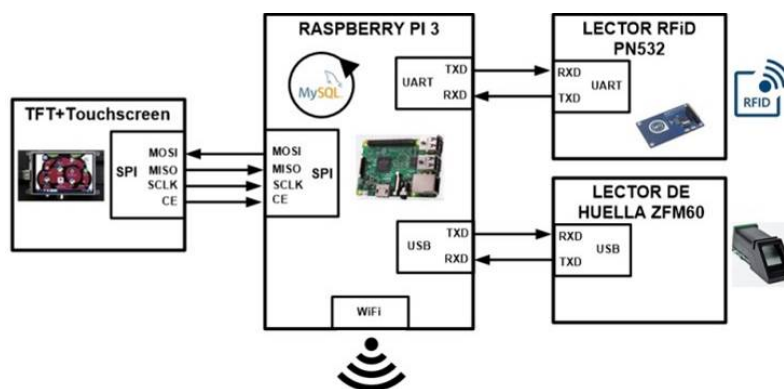


Figura 2 Arquitectura del módulo de control.

Las funciones del módulo de control son las siguientes: mantener actualizada la base de datos de usuarios y el contenido de la memoria flash del lector de huellas digitales de este módulo y de los módulos de acceso e implantar la interfaz gráfica de usuario mediante la cual el administrador del sistema accede la base de datos de usuarios e imágenes de huellas digitales.

En la tarjeta Raspberry Pi se utilizó una memoria SD de 16 GB para instalar el sistema operativo Raspbian kernel 4.9 y almacenar la base de datos de usuarios. El lector de tarjetas RFIID usado es el dispositivo NFC/RFID PN532. Puede escribir tarjetas y etiquetas RFIID tipo 1 a 4 e integra una antena cuyo alcance son 10 centímetros.

Tanto en el módulo de control como en los módulos de acceso el lector RFIID se conectó al puerto UART y se utilizó la biblioteca *libnfc* 1.7.0 para accederlo desde la Raspberry Pi. El lector de huellas digitales usado fue el dispositivo ZFM60 de ZhianTec. Este lector se comunica con un controlador externo a través de un puerto UART usando un protocolo propietario de tipo orden-respuesta. El voltaje de las señales TXD y RXD del ZFM60 es 5V, por lo que no es adecuado conectarlas directamente a las terminales GPIO RXD y TXD del UART de la Raspberry Pi y además el UART se usó en este módulo del sistema para conectar el lector RFIID, razones por las cuales se conectó el ZFM60 a un puerto USB de la Raspberry Pi a través un convertidor TTL-USB.

El puerto UART del ZFM60 se configuró para trabajar a una velocidad de 57,600 bps. Para llevar a cabo la comunicación entre la Raspberry Pi y el lector ZFM60 se usó la biblioteca de funciones para Python de código abierto *pyfingerprint*.

La pantalla táctil utilizada en el módulo de control para implantar la interfaz de usuario fue el dispositivo Pi+TFT de 3.5", el cual se conectó al puerto SPI de la tarjeta Raspberry Pi.

La dirección IP de la interfaz WiFi de cada módulo de acceso es fija y es usada para identificar el número de puerta en la que está intentando el usuario acceder.

El programa principal configura los temporizadores, el puerto UART, la interfaz WiFi, la pantalla táctil, inicializa el lector de huellas digitales, invoca la rutina de

comunicación con los módulos de acceso y entra a un ciclo donde implanta la interfaz de usuario, como se indica en el diagrama de flujo de la figura 3.

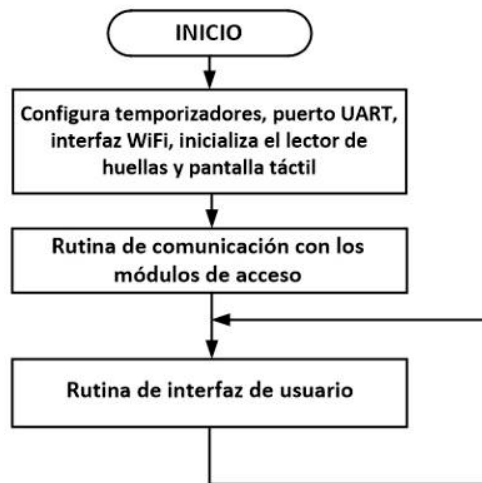


Figura 3 Diagrama de flujo del programa del módulo de control.

La comunicación entre los módulos de acceso y el módulo de control se llevó a cabo usando intercambio de mensajes con sockets bajo el esquema cliente-servidor, los módulos de acceso son los servidores y el módulo de control es el cliente. La rutina de comunicación con los módulos de acceso ejecuta un programa en segundo plano para crear un socket a través del cual el módulo de control transmite a los módulos de acceso los cambios en la base de datos de usuarios y en la memoria flash del lector de huellas para mantenerlas sincronizadas.

La rutina de interfaz de usuario permite al administrador realizar las siguientes operaciones: altas, bajas y cambios de usuarios, así como mostrar los usuarios registrados en la base de datos. Al registrar un usuario o realizar cambios a uno existente, la rutina transmite al módulo de acceso el índice del registro del usuario en la base de datos, su contenido y la plantilla de la huella digital. Al remover un usuario, la rutina solo transmite el índice del registro y el ID de la platilla de la huella digital. En la figura 4 se indica el menú de la interfaz de usuario mostrado en la pantalla táctil del módulo de control.

La base de datos de usuarios se implantó usando el manejador MySQL y contiene una tabla con los registros de usuarios. Cada registro almacena el UUID de la tarjeta



RFID asignada, el ID de la plantilla de la huella digital, el número de puertas a las que tiene acceso, nombre, compañía y correo electrónico del usuario. Para crear la base de datos y tabla de usuarios se usó el API de Python para MySQL.

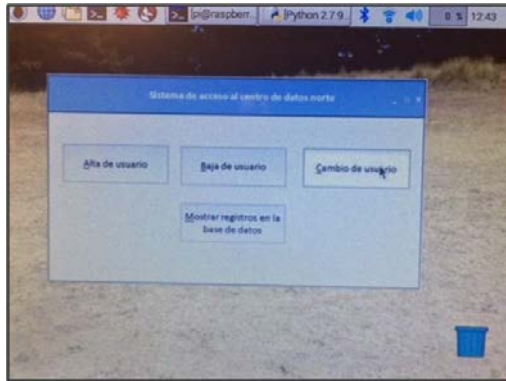


Figura 4 Menú de la interfaz de usuario del módulo de control

La rutina de interfaz de usuario ejecuta de manera general las siguientes acciones:

- Importa el API de Python para MySQL.
- Realiza la conexión a la base de datos.
- Espera la opción seleccionada por el usuario en la interfaz gráfica.
- Dependiendo la opción, define el query de sql para realizar la operación correspondiente sobre el registro del usuario.

### Los módulos de acceso

Se construyeron cinco módulos de acceso, todos con la misma arquitectura como la mostrada en la figura 5.

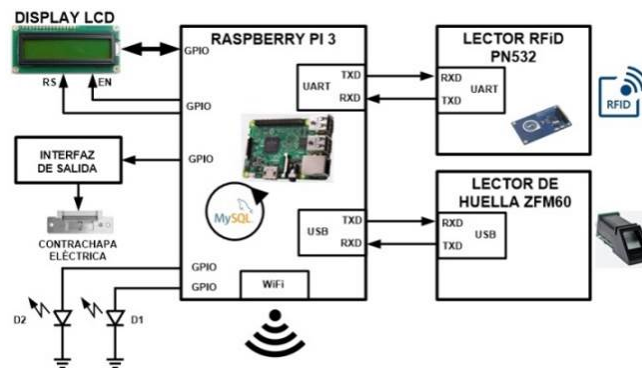


Figura 5 Arquitectura de los módulos de acceso.

Los módulos de acceso cuentan con componentes iguales al módulo de control, excepto que el lugar de una pantalla táctil, usan un display LCD 16x2, conectado a 6 terminales GPIO de la Raspberry Pi. En el display LCD se muestran al usuario los mensajes del sistema. La función principal de los módulos de acceso es explorar continuamente el lector RfID para determinar si se encuentra una tarjeta en su alcance. En caso afirmativo, leen la información contenida en la tarjeta y capturan la imagen de la huella digital para determinar si el usuario está autorizado a entrar. La programación de los módulos de acceso se realizó en Python 3.6. El programa principal realiza las siguientes tareas: configura los temporizadores, el puerto UART, la interfaz WiFi, el display LCD, las terminales GPIO, inicializa el lector de huellas digitales, invoca la rutina de comunicación con el módulo de control y entra a la rutina de lectura de tarjetas RfID. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo usado para desarrollar este programa.

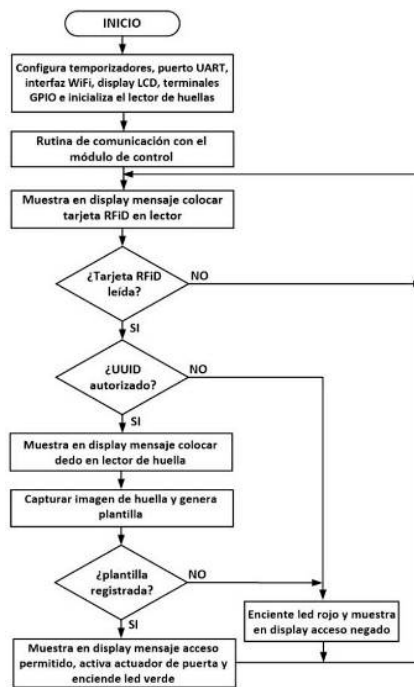


Figura 6 Diagrama de flujo del programa de los módulos de acceso.

En caso de que el usuario esté autorizado a entrar, muestra en el display LCD el mensaje indicando que debe colocar el dedo en el lector de huella digital, Si el UID se encuentra en la base de datos, captura la imagen de la huella y genera en un

buffer la plantilla correspondiente, buscar la plantilla generada en la memoria flash del lector y en caso de ser exitosa la búsqueda, muestra en el display LCD el mensaje de acceso permitido, activa el actuador de la puerta de acceso y enciende un led verde (D1).

Los leds y la interfaz del actuador de la puerta se conectaron a terminales GPIO de la Raspberry Pi configuradas como salidas. Cuando en el módulo de control se registra un usuario nuevo o se realizan cambios a uno existente, la rutina de comunicación recibe, desde el módulo de control, el índice del registro en la base de datos, su contenido y la plantilla de la huella digital. Con esta información el módulo de acceso registra la plantilla nueva en la memoria flash del lector de huellas y ejecuta el query de sql para insertar o actualizar el registro en la base de datos, respectivamente. Cuando un usuario es dado de baja, la rutina de comunicación solo recibe el índice del registro y el ID de la platilla de la huella digital y ejecuta el query de sql para remover el registro del usuario.

### **3. Resultados**

Para comprobar la funcionalidad del sistema se llevaron a cabo cinco grupos de pruebas. El primer grupo tuvo como objetivo medir el alcance del lector RfID de los módulos de acceso. Para llevar a cabo estas pruebas se usaron 50 tarjetas colocadas a diferentes distancias del lector, determinando que el alcance son 12 centímetros, un poco más de lo indicado por el fabricante del lector. Usando estas tarjetas se registraron en la base de datos los usuarios correspondientes. A continuación, se ejecutó el segundo grupo de pruebas cuyo objetivo fue verificar el funcionamiento del lector de huellas digitales. En estas pruebas se capturaron y registraron las huellas digitales de los 50 usuarios del primer grupo de pruebas. Posteriormente, los mismos usuarios intentaron entrar en diferentes módulos de acceso colocando su dedo en posiciones que variaron ligeramente respecto a la posición cuando les fue capturada su huella en el módulo de control. El reconocimiento fue exitoso ya que la plantilla creada al capturar la imagen es una caracterización general de la huella, permitiendo variaciones en la posición del dedo. Esta caracterización crea la plantilla capturando dos imágenes de la huella

para tener mayor exactitud y libertad en la posición del dedo. A pesar de esto, se presentaron problemas con algunos usuarios y no se pudo capturar la imagen de la huella. Esto sucedió cuando el usuario tenía húmedo el dedo. De hecho, el manual del fabricante del lector de huellas indica que esto puede suceder y recomienda repetir el proceso una vez limpio el dedo. El tercer grupo de pruebas tuvo como objetivo medir el tiempo de respuesta del sistema. Para realizar estas pruebas se registró en un archivo en cada módulo de acceso la hora de lectura de las tarjetas de usuarios autorizados a acceder y la hora de apertura de la puerta. El tiempo de respuesta fue 100 ms. en promedio. El cuarto grupo de pruebas tuvo como objetivo medir el alcance de la transmisión WiFi de los módulos de acceso. Para efectuar estas pruebas se ubicó un módulo de este tipo a diferentes distancias del punto de acceso WiFi Cisco WAP4410N. A continuación, se ejecutaron dos programas en el módulo: uno de ellos en segundo plano, cuya tarea fue transmitir continuamente un archivo al módulo de control y el segundo ejecutó el comando *iwconfig* para registrar la velocidad de transmisión y nivel de potencia de la señal WiFi recibida (RSSI- Received Signal Strength Indicator) desde el punto de acceso a cada lugar donde ubicó el módulo de acceso. Los resultados indicaron que el alcance fueron 50 metros con línea de vista a una velocidad de 195 Mbps, menor a los 300 Mbps que pueden lograrse teóricamente usando el estándar 802.11n. A una distancia mayor a 50 metros la potencia decreció aceleradamente y se perdió el enlace cuando el nivel cayó a los -82 dBm como se muestra en la gráfica de la figura 7.

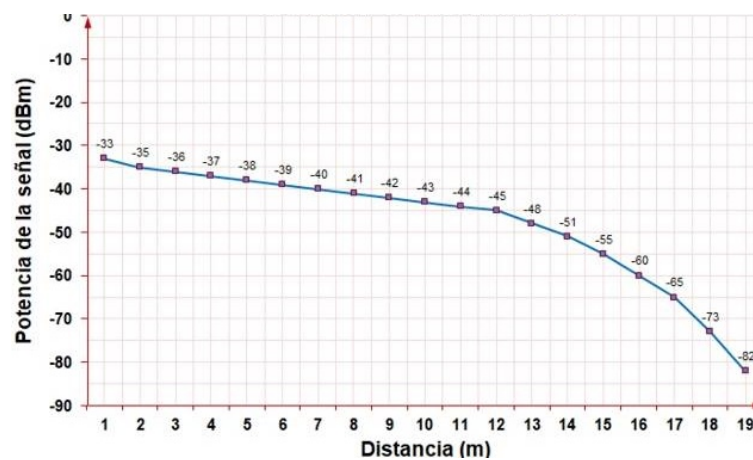


Figura 7 Alcance de la transmisión de los módulos de acceso

En el quinto grupo de pruebas se determinó el número de errores positivos del sistema. El lector de huellas digitales puede configurarse en uno de cinco niveles de seguridad, del 1 al 5, por defecto trabaja en nivel 3. El nivel de seguridad indica al lector la sensibilidad al comparar la plantilla de una huella con las imágenes almacenadas en la memoria flash, siendo el nivel 5 el de mayor sensibilidad.

El fabricante del lector indica que para el nivel 3 la tasa de rechazos falsos (FRR- False Rejection Rate) es menor a 1%. En este grupo de pruebas se configuró el lector de un módulo de acceso usando los cinco niveles de seguridad.

En cada nivel participaron 200 personas para contar con resultados más certeros. Se presentaron casos en cada nivel en los que el sistema indicó que el usuario no estaba autorizado a entrar aun cuando su huella estaba registrada. En el nivel 3 se presentaron 3 casos resultando un FRR de 1.5%, 0.5 % más que el indicado por el fabricante y un tiempo de respuesta de 100 ms. Los resultados obtenidos mostraron que usando un mayor nivel de sensibilidad el FRR disminuye y el tiempo de respuesta aumenta, como se indica en la tabla 1. No es grande la diferencia entre el tiempo de respuesta del nivel 1 con respecto al 5 y por esta razón, el lector de los módulos de acceso se configuró en nivel 5 para tener el menor FRR, mayor sensibilidad y 99.5 de confiabilidad.

En la figura 8 se muestra la gráfica que indica la relación entre el FRR y el tiempo de respuesta del sistema.

Tabla 1 Niveles de seguridad usados, FRR y tiempos respuesta obtenidos.

Nivel de seguridad	FRR (%)	Errores positivos (huellas no reconocidas)	Tiempo de respuesta (ms)
1	3	6	60
2	2	4	80
3	1.5	3	100
4	1	2	110
5	0.5	1	119

#### 4. Discusión

Adicionalmente a las pruebas realizadas, para verificar que el nivel de potencia reportado por el comando *iwconfig* fuera correcto, en cada punto donde se ubicó el módulo de acceso se colocó una computadora portátil para medir el nivel de RSSI

utilizando el programa *inSSIDer*. Los valores de RSSI medidos con *inSSIDer* no tuvieron gran diferencia respecto a los indicados por el comando *iwconfig*. En caso de ser necesario incrementar el alcance de la transmisión inalámbrica pueden usarse extensores de rango o repetidores inalámbricos WiFi. Es importante considerar que el lector puede almacenar hasta 1,000 imágenes de huellas digitales, lo cual puede ser una limitación en instalaciones con grandes cantidades de usuarios. Finalmente, y tal vez lo más importante, el sistema implantado no fue solo una investigación o desarrollo tecnológico experimental, es una aplicación que resuelve una necesidad real.

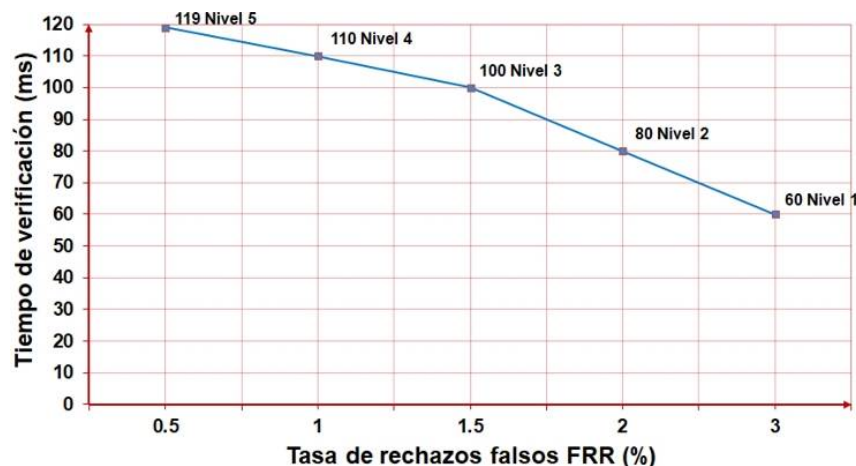


Figura 8 Tasa de rechazos falsos obtenida en las pruebas y tiempo de respuesta.

## 5. Conclusiones

Se desarrolló un sistema de acceso usando como mecanismos de identificación una tarjeta RfID y la huella digital, el cual cumplió con las especificaciones solicitadas: confiable, fácil de administrar y de respuesta rápida. Una vez que se probó y evaluó el sistema en el centro de datos, se ha solicitado realizar una segunda versión del mismo que incorpore dos funcionalidades: 1) Una bitácora en el módulo de control que registre los intentos de acceso exitosos y no exitosos en los módulos de acceso, incluyendo la información leída de la tarjeta RfID, fecha, hora y número de puerta, pudiendo ser consultada desde la interfaz de usuario de este módulo y 2) Reconocimiento facial del usuario en los módulos de acceso para contar con un nivel de seguridad más alto al logrado en este trabajo.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Addy, D. & Bala, P. Physical access control based on biometrics and GSM. International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI) Proceedings. Jaipur, India. Sept., 2016.
- [2] Burzacca, P., Mircoli, M. & Mitolo, S. iBeacon technology that will make possible Internet of Things. International Conference on Software Intelligence Technologies and Applications & International Conference on Frontiers of Internet of Things Proceedings. Hsinchu, Taiwan. Dec., 2014.
- [3] Derawi, M. O., McCallum, S. & Witte, H. Biometric access control using Near Field Communication and smart phones. 5th IAPR International Conference on Biometrics (ICB). New Delhi, India. March, 2012.
- [4] Dudheria, R. Evaluating Features and Effectiveness of Secure QR Code Scanners. International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC) Proceedings. Nanjing, China. 12-14 Oct., 2017.
- [5] Kavitha, K. J. & Shan, B. P. Implementation of DWM for medical images using IWT and QR code as a watermark. Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS) Proceedings. Tiruchengode, India. March, 2017.
- [6] Lay, K. T. & M. H. Zhou. Perspective projection for decoding of QR codes posted on cylinders. IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA) Proceedings. Kuching, Malaysia. Sept., 2017.
- [7] Lima, V. M., Lima, R. M. & Lins, F. A. A multi-perspective methodology for evaluating the security maturity of data centers. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) Proceedings. Banff, AB, Canada. Oct., 2017.
- [8] Palencia, G. P., Bernadez, H. L. & Enriquez, L. P. Time-controlled access with power management using RFID acquisition and power control distribution. International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment Proceedings. Cebu City, Philippines. Dec., 2015.

- [9] Pramkeaw, P, Ganokratanaa, T. & Phatchuay, S. Integration of Watermarking and QR Code for Authentication of Data Center. 12th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS) Proceedings. Napoles, Italy. Nov., 2016.
- [10] Srinivasan, V. S., Kumar, S. T. & Yasarapu, D. K. Raspberry Pi and iBeacons as environmental data monitors and the potential applications in a growing BigData ecosystem. IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT) Proceedings. Bangalore, India. May, 2016.
- [11] Wang, X. L., Wu, C. F., & Li, G. D. A robot navigation method based on RFID and QR code in the warehouse. Chinese Automation Congress (CAC) Proceedings. Jinan, China. Oct., 2017.
- [12] Zhang, X., Luo, H. & Peng, J. Fast QR code detection. International Conference on the Frontiers and Advances in Data Science (FADS) Proceedings. Xi'an, China. Oct., 2017.



# **DISEÑO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS A RED CON TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO Y REDES NEURONALES**

DESIGN OF GRID TIED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH SOLID STATE TRANSFORMER AND NEURAL NETWORKS

**César Enrique Xool Ramírez**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*cesar.xool@gmail.com*

**Luis Josué Ricalde Castellanos**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*lricalde@correo.uady.mx*

**Braulio José Cruz Jiménez**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*acastill@correo.uady.mx*

**Ricardo Javier Peón Escalante**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*rpeon@correo.uady.mx*

**Alejandro Arturo Castillo Atoche**

Universidad Autónoma de Yucatán  
*braulio.cruz@correo.uady.mx*

## **Resumen**

Este artículo presenta el diseño de un sistema de generación de energía fotovoltaico incorporando un transformador de estado sólido para la integración a red. El transformador está comprendido de dos etapas, la conversión DC-DC (Dual Active Bridge) e Inversor, alimentados por un arreglo de módulos fotovoltaicos. El principal objetivo de esta investigación es poder extraer la máxima potencia del arreglo, utilizando un control proporcional integral y una red neuronal capaz de determinar el voltaje de máxima potencia necesario para transferir la potencia cosechada a la etapa de conversión DC-DC.

**Palabras Claves:** Control PI, redes neuronales, seguimiento de punto de máxima potencia, sistemas fotovoltaicos, transformador de estado solido.

## **Abstract**

*This paper presents the design of a photovoltaic energy generation system incorporating a solid-state transformer for grid integration. The transformer is composed of two stages, DC-DC conversion via a dual active bridge and an inverter, feed from a photovoltaic module array. The main objective of this research is to extract the maximum power from the array, using a proportional-integral control and a neural network able to estimate the maximum power point voltage required to transfer the harvested power into the DC-DC conversion stage.*

**Keywords:** *Maximum power point tracking, neural networks, PI control, photovoltaic systems, solid-state transformers.*

## **1. Introducción**

Los transformadores convencionales o transformadores de baja frecuencia han sido ampliamente usados en diferentes áreas, siendo sus principales funciones la conversión de voltaje, aislamiento, aseguramiento en la estabilidad en el voltaje y transferencia de energía. Los transformadores tradicionales (cobre y hierro convencionales) son altamente confiables, relativamente baratos y bastante efectivos, pero tienen algunos inconvenientes tales como gran tamaño, grandes cantidades de cobre o hierro en los devanados, caídas de voltaje bajo carga, sensibilidad a los armónicos, pobre desempeño bajo desbalance en la carga, así como problemas ambientales derivado del uso de aceites minerales.

Como alternativa al transformador de baja frecuencia, las topologías del transformador de estado sólido han sido investigadas recientemente debido a las ventajas que presenta con respecto al transformador convencional. Adicionalmente, el transformador de estado sólido puede incorporar esquemas de control inteligente los cuales no son posibles con los transformadores actuales, tales como regulación de voltaje, compensación de potencia reactiva, flujo de potencia bidireccional, etc.

La operación básica del SST es cambiar el voltaje AC 50/60 Hz a alta frecuencia AC. Esta salida AC en alta frecuencia es transmitida a través de un transformador de alta frecuencia el cual realiza la operación necesaria de conversión de voltaje mientras provee aislamiento galvánico entre la entrada y el lado de carga. La salida

AC en alta frecuencia del secundario del transformador se convierte de vuelta a 50/60 Hz para alimentar la carga o la red de distribución. La figura 1 muestra el diagrama del transformador de estado sólido.

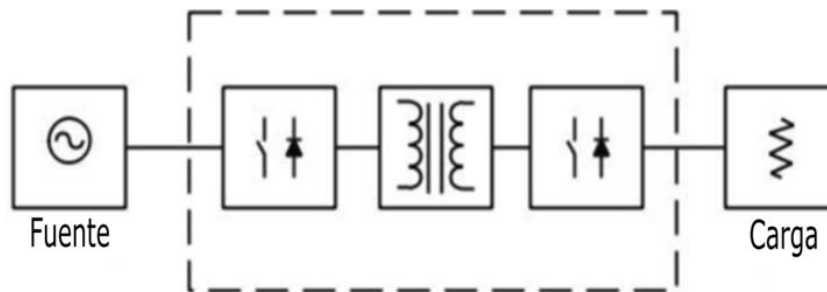


Figura 1 Diagrama de bloques del transformador de estado sólido.

La literatura actual propone el convertidor de puente activo dual (DAB) como el convertidor DC-DC más adecuado para ser utilizado en la configuración de un transformador de estado sólido. El convertidor DAB es un concepto propuesto en la época de los 90's, su implementación fue restringida por las limitaciones en los dispositivos para aplicaciones de alta potencia. Hoy en día, los dispositivos de potencia que ha surgido (SiC y GaN) y novedosos materiales magnéticos, hacen del concepto del DAB más factible en su implementación.

[Ankita, 2016] proponen un método para rastreo del punto máximo de potencia (MPPT) con control de desplazamiento de un inversor de una fase, el cual utiliza un transformador de estado sólido conectado a un arreglo fotovoltaico.

En el trabajo presentado por [Liu et al, 2016], el sistema fotovoltaico con transformador de estado sólido consiste en dos etapas de potencia. Un DHB (Dual Half Bridge), y un inversor conectado a la red. El convertidor DHB constituye la primera etapa de potencia, que tiene como objetivo lograr las funciones de seguimiento del punto máximo de potencia (MPPT). [Marei, 2016] presenta un sistema de interface basado en el convertidor Dual Active Bridge (DAB) para arreglos fotovoltaicos. Dos estrategias de control son propuestas para el convertidor DAB para alcanzar la máxima potencia que pueda proporcionar el arreglo fotovoltaico. La primera estrategia se basa en un controlador PI simple para regular el voltaje terminal PV a través de un cambio de ángulo de fase del convertidor DAB.

El seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) usando la técnica de perturbar y observar (P&O) es utilizada para fijar el voltaje terminal PV. La segunda estrategia presentada es emplear una red neuronal artificial (ANN) para establecer directamente el ángulo de cambio de fase del convertidor DAB que resulta en la máxima potencia que el módulo fotovoltaico puede proporcionar.

[Shi, 2016] propone un sistema fotovoltaico consistente en un convertidor DAB alimentado por corriente (CF-DAB, Current-Fed Dual Active Bridge) con un inversor multi-cascada. Se presenta un novedoso algoritmo MPPT de paso variable para asegurar no solo la alta eficiencia del MPPT, sino también una extracción de la máxima potencia bajo un cambio de irradiancia.

El objetivo del presente trabajo es describir las partes que conforman el transformador de estado sólido, así como su funcionamiento y desempeño cuando este se integra a sistemas fotovoltaicos. Adicionalmente, se evalúa el comportamiento de una red neuronal para generar una referencia de voltaje a modo de seguimiento del máximo punto de potencia y su tiempo de respuesta.

## 2. Métodos

### Modelo matemático del transformador de estado sólido

El diagrama de bloques general de la operación de un transformador de estado sólido se muestra en la figura 2, y comprende 3 etapas: la conversión AC- DC usando un rectificador, conversión DC a DC usando DAB (Puente Activo Dual) y conversión DC- AC usando un inversor.



Figura 2 Elementos de un transformador de estado sólido.

El principal objetivo del modelo DAB es elevar el voltaje AC un bus de voltaje DC usando el rectificador. Entonces, el DAB puede convertir el alto voltaje en DC a un bajo voltaje DC. El bajo Voltaje DC permite integrar energías renovables.

Las ecuaciones dinámicas que gobiernan el modelo DAB están dadas por las ecuaciones 1 a 6, las cuales se derivan aplicando las leyes de Kirchoff en el circuito de la figura 3.

$$L_g \frac{di_g}{dt} = V_g - V_{cfr} - R_g i_g \quad (1)$$

$$L_{fr} \frac{di_{fr}}{dt} = V_{cfr} - S V_i - R_{fr} i_{fr} \quad (2)$$

$$C_{fr} \frac{dV_{cfr}}{dt} = i_g - i_{fr} \quad (3)$$

$$C_{dcH} \frac{dV_{dcH}}{dt} = S i_{fr} - S_1 i_{tp} \quad (4)$$

$$L_t \frac{di_{tp}}{dt} = S_1 V_{dcH} - R_t i_{tp} - S_2 V_{dcL} \quad (5)$$

$$C_{dcL} \frac{dV_{dcL}}{dt} = S_2 i_{tp} - i_N \quad (6)$$

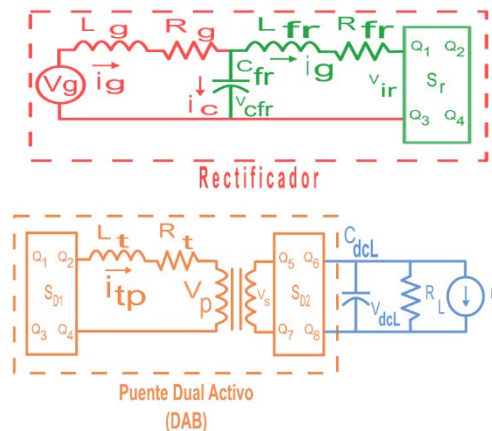


Figura 3 Esquemático del transformador de estado sólido.

Dónde:  $V_G$  es el voltaje de red,  $L_G$  la inductancia de la red,  $R_G$  resistencia de la red,  $C_{fr}$  la capacitancia del filtro rectificador,  $L_{fr}$  inductancia en el filtro rectificador,  $R_{fr}$  resistencia en el filtro rectificador,  $i_g$  corriente de la red,  $i_c$  corriente de capacitor en el filtro,  $V_{dcH}$  voltaje de entrada del DAB,  $L_t$  inductancia referida a primario del

transformador,  $R_i$  resistencia referida al primario del transformador,  $i_{ip}$  corriente del primario del transformador,  $i_{is}$  corriente del secundario del transformador,  $V_p$  voltaje primario transformador,  $V_s$  voltaje del secundario del transformador,  $C_{dcL}$  capacitancia del lado bajo voltaje,  $R_i$  resistencia,  $V_{dcL}$  voltaje,  $i_N$  corriente de salida a través de la resistencia de carga  $R_L$ , y  $S, S_1, S_2$  funciones de interrupción.

### Puente activo dual (DAB)

El convertidor DAB consiste de dos puentes H los cuales están interconectados a través de un transformador de alta frecuencia como se muestra en la figura 4.

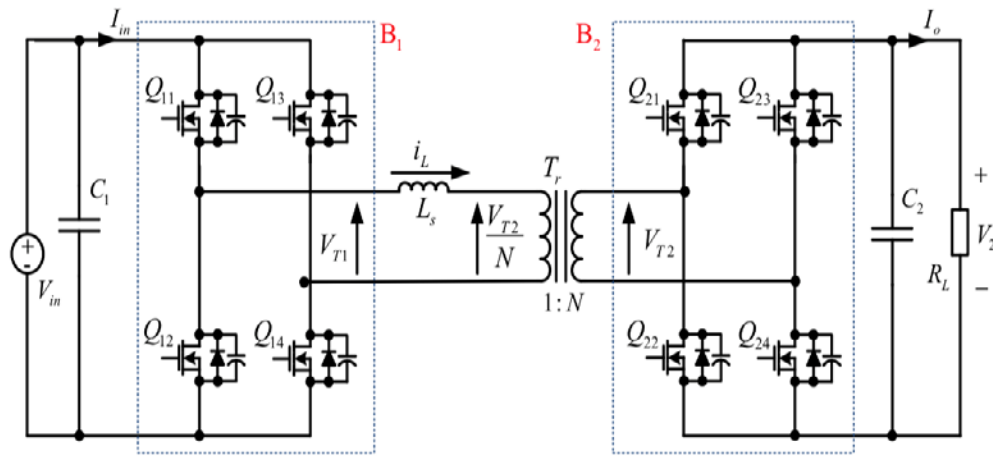


Figura 4 Convertidor Dual Active Bridge (DAB).

Los dos puentes están conectados a dos fuentes DC con un inductor en el medio. La transferencia de potencia entre ambos puentes se obtiene haciendo uso de una estrategia de control para los interruptores en ambos puentes de modo que haya un cambio de fase entre los voltajes en los dos puentes. Para el propósito de este análisis el transformador entre los dos puentes se considera que tiene una relación de vueltas de 1:N. La figura 5 representa las formas de onda de la operación típica del DAB.

El voltaje  $V_1$  es mayor que el  $V_2$  en este caso. La forma de onda de la corriente fluyendo en el inductor, tal y como se muestra en la ecuación 7.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{T1} - V_{T2}(t) / N}{L_s} \quad (7)$$

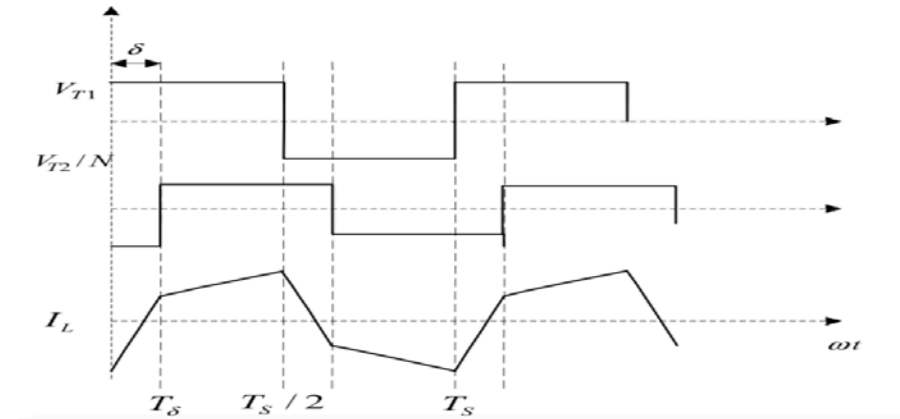


Figura 5 Formas de onda en el DAB.

Resolviendo la ecuación 7 para cada periodo de tiempo del ciclo anterior obtenemos lo mostrado en ecuaciones 8 y 9:

- Para  $0 < \theta < \delta$

$$i_L(\theta) = \left( \frac{V_{T1} + \frac{V_{T2}}{N}}{\omega L_s} \right) \theta + i_L(0) \quad (8)$$

- Para  $\delta < \theta < \pi$

$$i_L = \left( \frac{V_{T1}(t) - \frac{V_{T2}(t)}{N}}{\omega L_s} \right) (\theta - \pi) + i_L(\delta) \quad (9)$$

Usando el principio de que el valor promedio de la corriente en un inductor sobre un ciclo debe ser cero, podemos derivar la ecuación para la corriente en el tiempo cero de las ecuaciones 8 y 9 obtenemos la ecuación 10.

$$i_L(0) = - \left( \frac{2 \left( \frac{V_{T2}}{N} \right) \delta + V_{T1} \pi - \left( \frac{V_{T2}}{N} \right) \pi}{2 \omega L_s} \right) \quad (10)$$

A partir de la ecuación de la corriente (ecuación 10) en diferentes intervalos y los voltajes que tenemos, la potencia nominal de un DAB sobre un ciclo de operación queda expresada en la ecuación 11.

$$P_0 = \int_0^{T_s} V_{T1}(\theta) i_L(\theta) d\theta \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación 11 nos queda la expresión que define la transferencia de potencia en el DAB (ecuación 12).

$$P_0 = \frac{V_{in} V_2 \delta (\pi - \delta)}{\omega L_s \pi N} \quad (12)$$

### Arreglo de módulos fotovoltaicos

Se utilizó el software MATLAB/SIMULINK para llevar a cabo la simulación del sistema de generación fotovoltaica. Dicho software cuenta con un bloque con el cual es posible simular el arreglo fotovoltaico, ingresando los valores incluidos en la hoja de datos del modelo seleccionado (Marca Solartec, modelo S60PC-260, 2x7 módulos) que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Características del módulo fotovoltaico.

Descripción	Unidades
Voltaje Circuito Abierto (Voc)	36.64 V
Voltaje punto máximo potencia (Vmpp)	30.84 V
Corriente de corto circuito (Isc)	7.13 A
Corriente Punto máximo de potencia (Impp)	6.75 A
Potencia máxima	208 W
Eficiencia	16.01%
<b>Coefficientes de temperatura</b>	
de Isc	0.01% /°C
de Voc	-0.31% /°C

### Seguimiento del punto de máxima potencia

En este trabajo se emplea una red neuronal para obtener el punto de máxima potencia del mencionado arreglo fotovoltaico. Para obtener los datos de entrenamiento, se utilizó un simulador de módulo fotovoltaico (en Matlab/Simulink), con los cuales se generaron 120 curvas de potencia que serán utilizados para entrenar la red neuronal (figura 6). Se anexa a continuación un esquema de la red a entrenar con sus características.



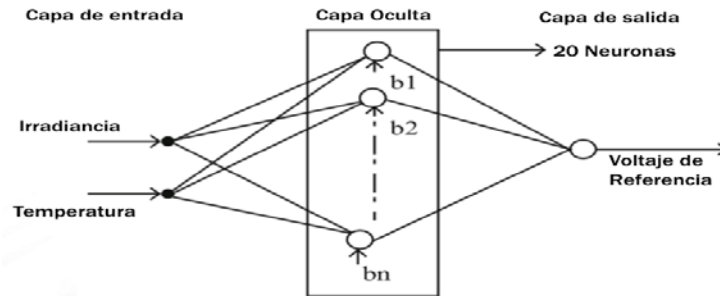


Figura 6 Red neuronal con capacidad de encontrar el voltaje de máxima potencia.

### Simulación del puente activo dual (DAB)

Para el circuito a implementar para la etapa de conversión DC-DC se utilizarán 8 interruptores con un transformador de alta frecuencia como etapa de aislamiento, trabajando a una frecuencia de 20 kHz, cuyas características se anexan en la tabla 2. El método de control de fase empleado será el SPS (cambio de fase simple).

Tabla 2 Características del transformador de alta frecuencia

Resistencia devanado primario, $R_p$	0.075 Ohms
Inductancia devanado primario, $L_{lp}$	1.25e-6 Henrios
Resistencia devanado secundario, $R_s$	1.2 Ohms
Inductancia devanado secundario, $L_{ls}$	20e-6 Henrios
Relación, N	1:2

### Diseño del controlador

Para poder controlar la potencia transferida del arreglo de módulos al puente activo dual, se requiere buscar el ángulo para el cambio de fase, comparando el voltaje proveniente del arreglo fotovoltaico con la referencia generada a través de la red neuronal figura 7, para obtener el error respectivo. El error es enviado a un control proporcional integral con las ganancias: Proporcional = - 7, Integral = - 0.007.

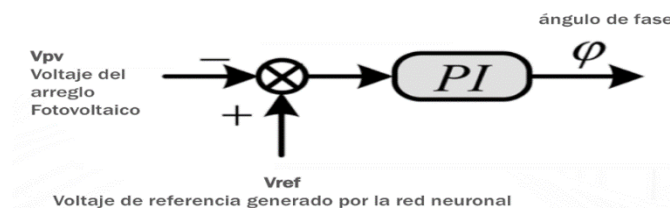


Figura 7 Control PI.

La figura 8 muestra el diagrama del transformador de estado sólido tal y como se implementó en la simulación.

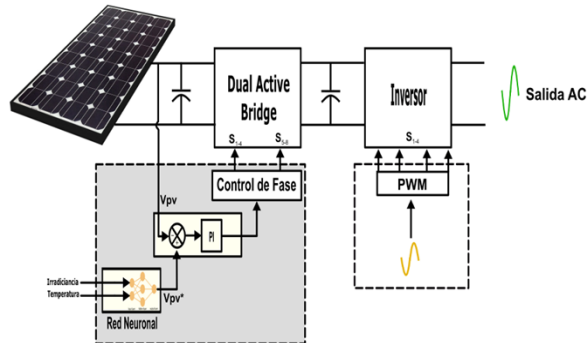


Figura 8 Diagrama de bloques del transformador de estado sólido y sistema fotovoltaico.

### 3. Resultados

La figura 9 muestra la potencia, voltaje y corriente cosechados en el arreglo fotovoltaico conforme la irradiancia y la temperatura van cambiando con respecto al tiempo mostrados en la figura 10. Estos cambios en la irradiancia son para evaluar el desempeño dinámico del sistema propuesto. Se puede ver con claridad que el sistema logra cosechar la máxima potencia desde el arreglo fotovoltaico aun en condiciones dinámicas. Como es de esperarse, la máxima potencia va cambiando conforme la irradiancia y la temperatura lo hacen.

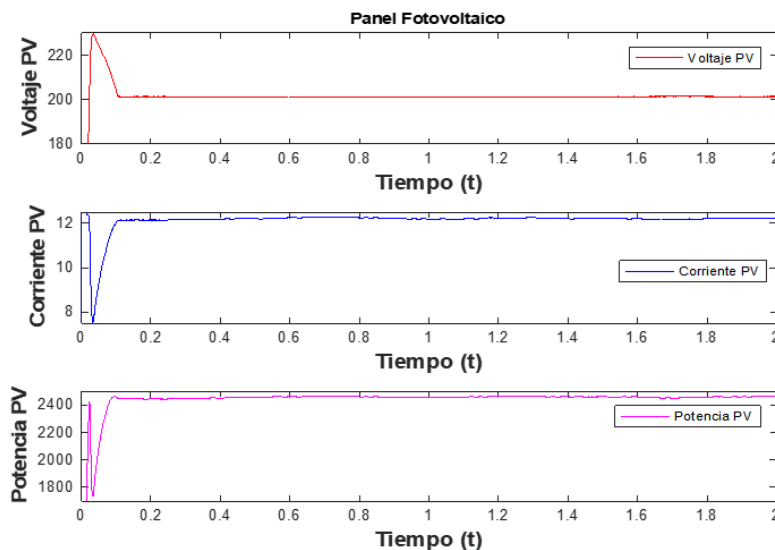


Figura 9 Potencia, voltaje y corrientes en el arreglo fotovoltaico.

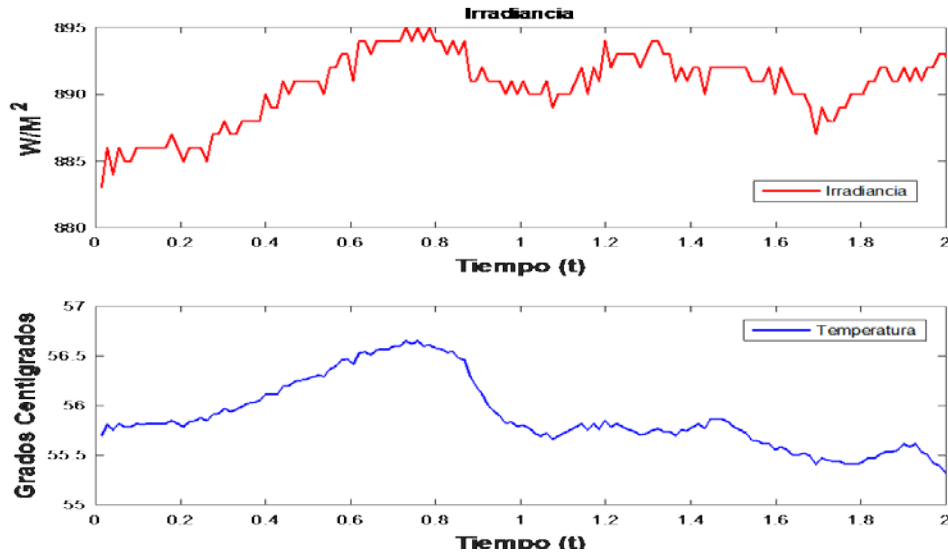


Figura 10 Irradiancia y temperatura durante simulación.

La red neuronal artificial (ANN) propuesta consta de tres capas; capa de entrada, capa oculta y capa de salida. La ANN tiene 2 entradas, irradiancia y temperatura, una salida, que corresponde al voltaje en el punto de máxima potencia (Voltaje de referencia). La capa oculta tiene 20 neuronas con la función de activación tangsig y la capa de salida tiene una sola neurona con la función purelin. El entrenamiento utilizado fue el algoritmo Levenberg–Marquardt. La ANN determina la referencia de voltaje requerido, equiparable al voltaje en el punto de máxima potencia en el mismo instante que la irradiancia y la temperatura cambian. Dicho comportamiento se puede observar en la figura 11, donde es posible evidenciar el cambio del voltaje de referencia durante el tiempo de simulación.

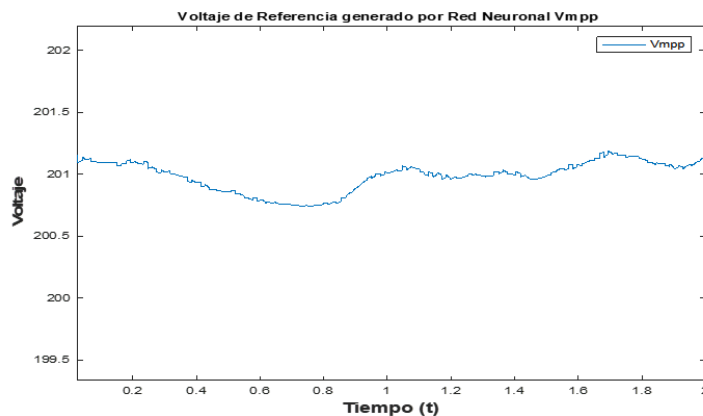


Figura 11 Referencia generada a través de la red neuronal.

El voltaje a la entrada y a la salida del DAB se muestran en la figura 12, donde el voltaje a la salida aumenta debido a la relación de transformación.

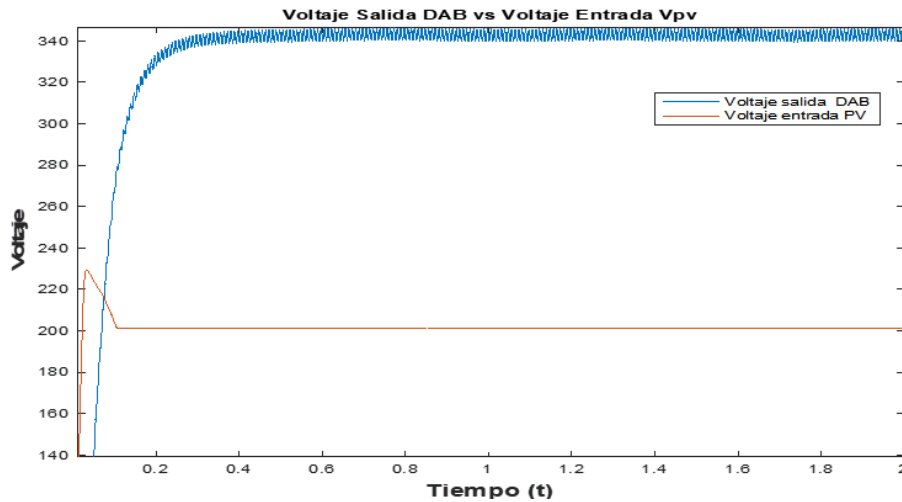


Figura 12 Voltaje de salida y entrada en el DAB.

De igual forma, el voltaje del arreglo fotovoltaico tiende a mantenerse cerca del valor de referencia. La figura 13 muestra los pulsos en los interruptores para cada puente en el convertidor DAB. Los pulsos para el puente del lado primario son mostrados en la figura 13a y los interruptores en el lado secundario, en la figura 13b. Se puede observar que los pulsos en el lado secundario están desfasados con respecto a los del lado primario, lo cual evidencia el cambio de fase.

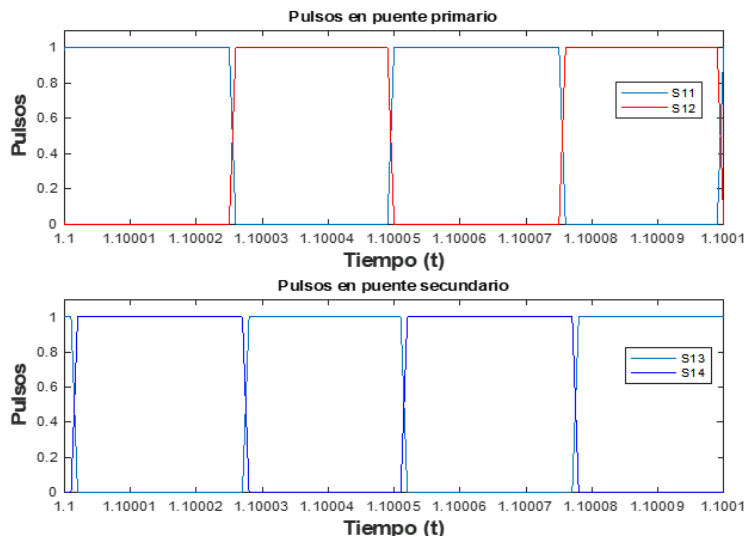


Figura 13 (a) Pulsos en puente primario y (b) pulsos en el puente secundario

Los voltajes en el devanado primario y secundario del transformador de alta frecuencia son mostrados en la figura 14.

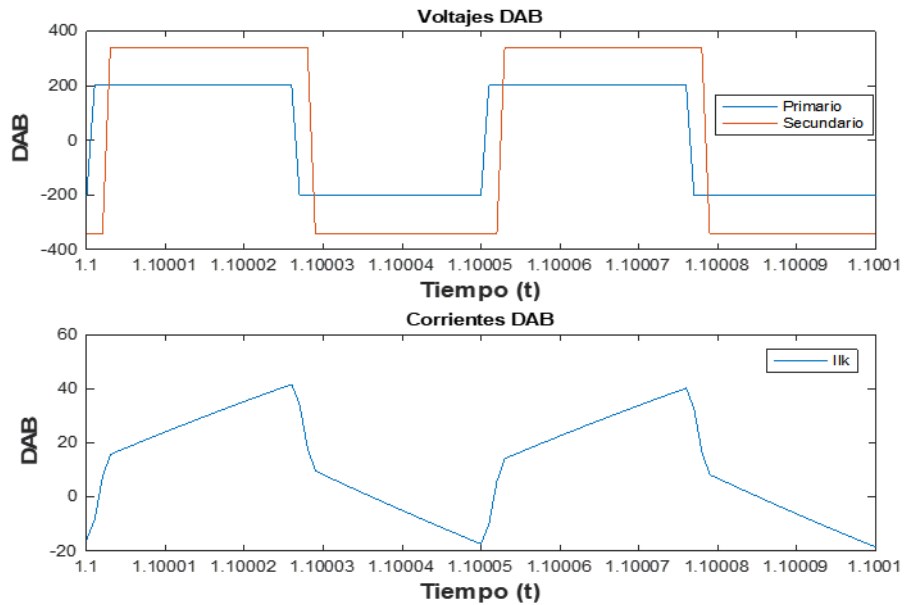


Figura 14 Voltajes y corrientes en el DAB.

El cambio de fase y la relación de transformación del transformador se hacen evidentes en este resultado. La figura 15 muestra como el control proporcional integral esta regulando estrechamente el voltaje en el arreglo fotovoltaico a la referencia generada por la red neuronal artificial.

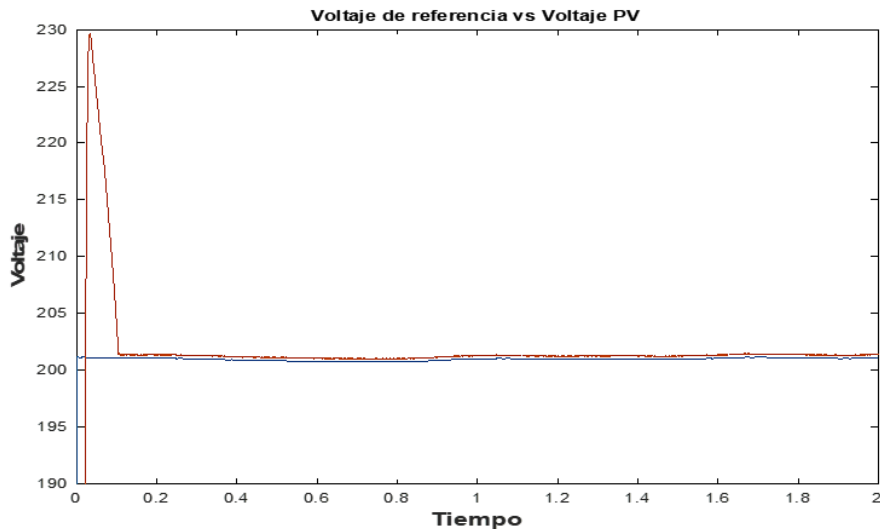


Figura 15 Voltaje de máxima potencia generado por la red neuronal.

La figura 16 muestra el voltaje y corriente AC a la salida del inversor.

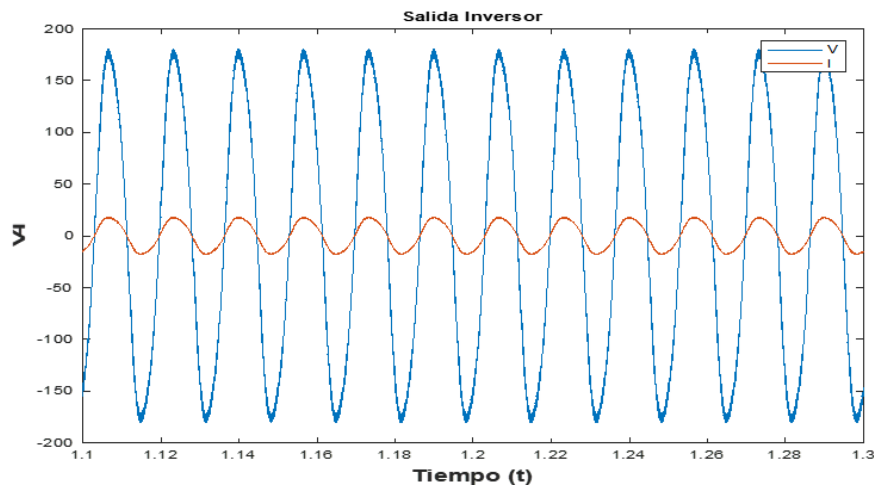


Figura 16 Voltaje y corriente a la salida del inversor.

Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de un transformador de estado sólido y las diferentes partes que lo conforman, y su integración un arreglo de paneles fotovoltaicos. Se puede ver que el algoritmo con red neuronal es factible de ser usado para controlar la etapa de conversión DC – DC (puente activo dual) y su respuesta es rápida (alcanza el valor de máxima potencia alrededor de 0.1 segundos), pero que aún es factible de ser mejorada. El diseño actual del transformador solo contempla la etapa DC-DC antes mencionada y el inversor, no siendo esta la única configuración posible, en la literatura es posible encontrar diversas configuraciones, pero se optó por utilizar esta debido a la integración con el arreglo fotovoltaico.

#### 4. Discusión

Se puede observar que en los resultados obtenidos se ve reflejado el comportamiento de las diferentes partes que conforman el transformador de estado sólido. Se puede apuntar que en su diseño emplea etapas las cuales deben estar en sincronía para poder trabajar de manera apropiada. Cabe resaltar que el método de control propuesto no es el único, ya que, por ejemplo, utilizar un control de fase diferente al plasmado en este trabajo conlleva a estrategias diferentes las cuales mejoran el desempeño del dispositivo en cuestión. Es de resaltar lo crítico que

resulta el diseño y parámetros del transformador de alta frecuencia, para el buen funcionamiento del sistema, tomando en cuenta que dicha configuración se implemente físicamente. De igual forma, se hace mención que el inversor en este caso está trabajando de manera aislada, lo cual conlleva a que, en futuros trabajos, se podría utilizar diferentes estrategias, dirigidas a mejorar el factor de potencia, disminución de armónicos etc.

## **5. Conclusiones**

Este trabajo presenta una descripción de la operación de los elementos que conforman un sistema de generación fotovoltaica conectada a red mediante un transformador de estado sólido. Se describe un esquema para el seguimiento del punto de máxima potencia en un sistema fotovoltaico interactuando con el puente activo dual utilizando una red neuronal artificial. El puente activo dual es controlado para regular el voltaje PV al valor que proporciona la máxima potencia. Un controlador PI simple es utilizado para generar el cambio de fase apropiado en el puente activo dual. El sistema propuesto es modelado y simulado en MATLAB/SIMULINK. Los resultados obtenidos muestran que el sistema fotovoltaico mantiene el punto de máxima potencia con una precisión aceptable y una respuesta dinámica rápida a los cambios en las condiciones ambientales. Es de notar que en la literatura actual el transformador de estado sólido es utilizado para interactuar con la red de media tensión (en el orden de los kV), mediante un rectificador, en la mayoría de los casos encontrados. Sin embargo, la interacción de un sistema fotovoltaico con un transformador de estado sólido es un tema en el cual se empieza a investigar en la actualidad con mayor fuerza. Además, la implementación de un seguidor del punto de máxima potencia con red neuronal interactuando con los elementos que conforman un transformador de estado sólido es un tópico que no es tan común encontrar en la literatura actualmente, pero como se pudo apreciar en los resultados obtenidos, es una línea de investigación que puede mejorar el desempeño de un sistema de generación por fuentes renovables que utilice transformadores de estado sólido para una integración a red en un esquema compacto y eficiente.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Alam, K. S., Tria, L. A. R., Zhang, D., Rahman, M. F. Design and comprehensive modelling of solid state transformers (SST) based substation. IEEE International conference on power system technology, Powercon, 2016.
- [2] Ankita, V., & Vijayakumari A. A reduced converter count solid state transformer for grid connected photovoltaics applications. IEEE International Conference on emerging technological trends, 2016
- [3] Hossain, M., Rahim, N., Selvaraj, J. Recent progress and development of power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 218-222, 2018.
- [4] Khade, A., Gaonkar, S., Weakey, R. S., Chavan, R., Meshram, R. Stability enhancement of rectifier and DAB stages of SST model using Dynamic phasor based PI controller. IEEE 6th International Conference on Power Systems, ICPS, 2, 2016.
- [5] Liu, B., Zha, Y., Zhang, T., Chen, S. Solid state transformer application to grid connected photovoltaic inverters. IEEE International conference on smart grid and clean energy technologies, 248-251, 2016.
- [6] Marei, M., Helw, H., Al-Hasheem. Control strategies for the DAB based pv interface. PLOS ONE, 1-19, 2016
- [7] Ramanarayanan, V. Improved utilization of an HF transformer in DC-AC application. IET Power Electronics, 2011.
- [8] She, X. Control and Design of a high voltage solid state transformer and its integration with renewable energy resources and microgrid system. UMI Number: 3586206, North Carolina State University, 127-128, 2013.
- [9] Shi, Y., Li, R., Li, H., Xue, Y. High-frequency-link based grid-tied pv system with small DC-link capacitor and low-frequency ripple-free maximum power point tracking. IEEE Transactions on Power Electronics Volume: 31, Issue: 1,1-11, 2016.
- [10] Syed, I., & Xiao, W. Modeling and control of a DAB applied in a pv based DC microgrid. IEEE International Conference of power electronics, drivers and energy systems, 2012.