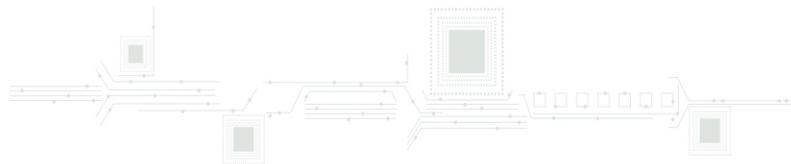


# Tecnologías Útiles para la Sustentabilidad Energética para Beneficio de la Sociedad

ISBN: 978-607-95255-8-3



**Libro Digital:  
Primera Edición**

# **Tecnologías Útiles para la Sustentabilidad Energética para Beneficio de la Sociedad**

**ISBN: 978-607-95255-8-3**

**IEEE Sección Morelos**

**Octubre del 2019  
Cuernavaca Morelos, México**

El IEEE Sección Morelos y sus capítulos de  
Potencia y Energía (PES),  
Computación (CS),  
Aplicaciones Industriales (IAS),  
y Comunicaciones (COMSOC),

Conjuntamente con el  
Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL)  
lograron integrar el presente libro digital denominado:  
"Tecnologías Útiles para la Sustentabilidad Energética  
para Beneficio de la Sociedad".

**Dr. Jorge Guillermo Calderón Guizar**  
Presidente del IEEE  
Sección Morelos

**Comité Editorial**

**Dr. Rafael Castellanos Bustamante  
Dr. Jesús Francisco Ponce Maldonado**

**Coordinadores por Disciplina**

**Dr. Manuel Mejía Lavalle**

**M.C. José Luis Silva Farías**

**M.C. Carlos Enrique Ramírez Valenzuela**

**M.C. Carlos Felipe García Hernández**

**Dr. José Manuel Franco Nava**

**Dr. José Antonio Ramón Muñoz Ledo Carranza**

**Dr. Roberto Flores Velázquez**

**Dr. Francisco Ponce Maldonado**

**Dr. Guillermo Calderón Guizar**

**Dr. Mario Limón Mendoza**

**Ciencias de la Computación**

**Potencia y Energía**

**Mecatrónica**

**Comunicaciones**

**Sistemas Mecánicos**

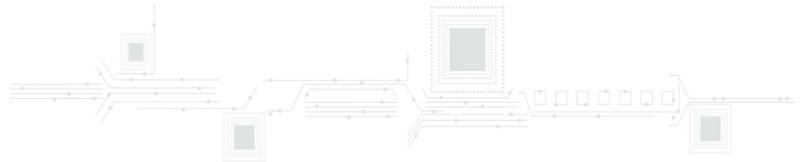
**Energías Renovables**

**Gestión de la Tecnología  
en la Educación y la Industria**

**Aplicaciones Industriales**

**Nuevas Tecnologías**

**Sistemas de Control**



## Índice

Comité Editorial

Coordinadores por Disciplina

Potencia y Energía

Cap. I

**9 On Convex Power Flow Analysis in DC Resistive Networks with Voltage-Dependent Load Models**

Oscar Danilo Montoya, Alexander Casilimas Peña, W. Gil González y Alejandro Garcés

**13 Diagnóstico Inteligente de Parques Eólicos**

P.H. Ibargüengoytia, U.A. García, A. Reyes Ballesteros

**29 Acoplamiento de un sistema de enfriamiento y calentamiento**

A. Acevedo, J. A. Hernandez, S. Silva, D. Juárez, A. Álvarez, A. Huicochea

**30 Implementación de señales de conmutación tipo SPWM en FPGA para inversores multinivel**

B. Chavarría, J. Aguayo, S. de León, J. Chacha

**31 Diseño y construcción de un inversor trifásico con modulación SPWM**

Adolfo Valdez Bahena, Susana E. De León Aldaco, Jesus Aguayo Alquicira,  
Amelia C. Rangel Pérez

**47 Construcción de un Transformador Defasador**

A. de León de León, H. Ruiz Ayala

**55 Demand Response Programs for Implementation in Pymes**

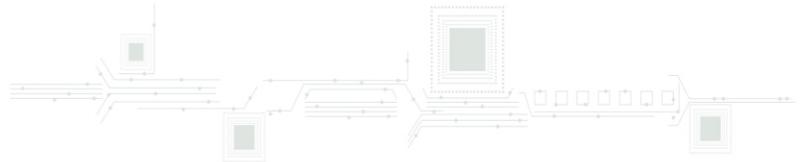
G. Sandoval, Y. Jimenez, S. Castro

**76 Control PWM para la Reducción de Potencia Consumida en Transmisor Inalámbrico Tipo Inductivo**

L. A. Sotres, L. Hernández, M. Carbajal, P. Guevarra

**91 Diseño de una deshidratadora solar automatizada**

J.J Dimas, J.G Cebada



Ciencias de la Computación Cap. II

**3 Interfaz de obtención de datos a través de Arduino y LabView, gestionados por PROLOG**

Víctor Adrián Espinosa de los Monteros Parra, a, David Tinoco Varela,  
Fernando Gudiño Peñaloza

**5 Sistema para la detección de placas de automóviles para ayuda a evitar el robo de automóviles**

G. García Barranco, J. Espíndola Flores, M. Larios Gómez, J. Francisco Leyva Bonilla,  
Hilario Salazar Martínez

**12 Diseño e implementación de un registrador de datos usando códigos BCH sobre un microcontrolador de ultra bajo consumo**

R. García-Hernández, N. A. Rodríguez-Olivares, S. Esquivel-García

**17 Método para remover evidencia del origen de la fotografía digital**

L. Betanzos, M. Cedillo-Hernández, M. Nakano-Miyatake, H. Pérez-Meana

**20 Discriminación de Grado de Humedad en Hojas Mediante Termografía Pulsada**

A. Fragoso-Mandujano, M. Pérez-Patricio, H. Guerra-Crespo, H. R. Hernández-de León,  
S. Velázquez-Trujillo, E. Simá

**28 Procedimiento de Muestreo-Reconstrucción de realizaciones de la suma de dos Procesos Gaussianos**

V. Kazakov, Y. Goritskiy, F. Mendoza

**37 Implementación de una LPS a partir de una AOPLA para la sistematización de la producción en empresas manufactureras textiles**

L.I. Arcos, E. Vazquez

**41 Blockchain Distributed Ledgers and Their Impact on Medicine**

Mauricio A. Saca

**45 Comparativa de herramientas de maquetado como técnica de obtención de requerimientos no funcionales**

Y. Rosales, B. A. Olivares, I. López, C. Romero, L. A. Reyes

**58 Redes neuronales de tercera generación como alternativa a Algoritmos Genéticos en el problema del camino más corto**

E. Cumplido, M. Mejía, G. Reyes, D. Mújica

**64 Sistema de control on/off con retroalimentación de temperatura para aplicaciones optoelectrónicas**

J. A. Gómez-de Paz, R. Grajales-Coutiño, J. L. Camas-Anzueto, S. Velázquez-Trujillo, H. R. Hernández-de León, J. Gómez-Pérez

**65 Algoritmo híbrido basado en Colonia de Abejas Artificiales para el ajuste de un sistema difuso para la selección de rutas**

R. Carrillo, E. Escobar, S. Velázquez, M. Pérez, H. Hernández, R. Olivera, C. de Coss, C. Pascacio, C. Gómez

**69 Aplicación Móvil para la creación de un mapa de incidencia criminal en el Estado de México mediante Procesamiento Digital de Imágenes y Redes Neuronales Artificiales**

T. A. Lira-Baca, R. Hernandez-Sanchez, M. Borboya-Melchor, D. Tinoco-Varela, F. Gudiño-Peñaloza

**70 Structure prediction of the human GPN-Loop GTPases protein family using Protein Structure Prediction Server and Pymol**

J. Juárez, M. R. Guevara-Villa, J. Newton

**71 Clasificación de naranjas mediante algoritmos supervisados**

F. Perez-Encina, G. Martínez-Tito, L. Gómez, Marco I. Ramirez-Sosa Moran, D. Martinez-Peon, M.A. Ochoa-Villegas

**73 Seguimiento de un punto laser en un video**

R. Romero, J. Yalja, A. Fernández

**74 Generador de números pseudoaleatorios con registros de corrimiento de retroalimentación lineal utilizando la metodología de diseño de codificador BCH implementado en una tarjeta FPGA**

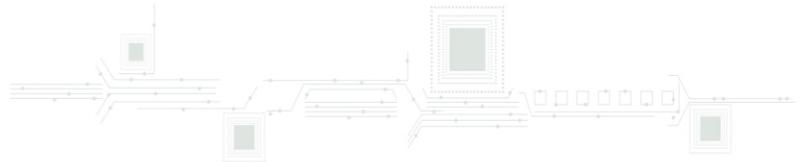
L. A. Hernández, V. Basurtos, X. Cabrera, F. A. Serrano

**75 Segmentación Eficaz y Eficiente de Imágenes del Cerebro Humano mediante el Modelo Neuronal de Intersección Cortical**

J.L. Soto-Piña, M. Mejía-Lavalle, K.S. Aguilar-Dominguez, J. Ruiz, G. Reyes

**77 Optimización de Contenedores para esferas navideñas, mediante evolución diferencial**

N. González-León, L. Flores-Pulido, E-A. Portilla-Flores



Ciencias de la Computación    Cap. II

**78 Desarrollo de módulos para sistemas de medición basado en un amplificador sincrónico digital a fase (LIA) implementado en una FPGA**

J.A. Zarate Garcia, J.H. Puebla Lomas, J. F. Serrano Talamantes

**79 Búsqueda de Cadenas en Textos Usando Árboles de Decisión**

S. González, J. Ruiz

**86 Diseño de una Gramática Libre de Contexto para la Identificación de Enunciados Prohibitivos en el Código Penal Federal**

M. Sánchez, L. F. Ríos

**89 Reconstrucción de objetos en 3-D por método de cambio de fase utilizando franjas RGB**

M. Alejandro López-Cristerna, J. Carlos Pedraza-Ortega, J. Manuel Ramos-Arreguin, Efrén Gorrostieta-Hurtado, Saúl Tovar-Arriaga, Rodrigo Escobar Díaz-Guerrero

Sistemas Mecánicos    Cap. III

**42 Análisis del estado de esfuerzos de los martillos de forja en frío para la fabricación de cañones de armamento**

A. Hernández, V. F. Verduzco, G. Urriolagoitia, B. Romero, G. M. Urriolagoitia, C. R. Torres

**44 Influencia de patrones de flujo en predicción de caídas de presión en instalación experimental de flujo en dos fases**

E. E. Vázquez-Ramírez, E. García-Sánchez, I. Urbina-Salas, L. M. Morales de Anda, J. M. Riesco-Ávila L. Canizalez-Dávalos

**60 Simulación Cooperativa de un Gripper Agro-Flexible**

M. A. Pérez, H. León

**23 Inclínometro óptico utilizando fibra óptica monomodo para el monitoreo de desplazamiento vertical de estructuras civiles**

J. Lara, J. Camas, R. Grajales, R. Mota, M. Pérez

**24 Medición de corriente eléctrica usando Redes Neuronales**

E. González, J. Camas, E. Escobar, J. Velázquez, R. Grajales

**26 Prototipo opto mecatrónico para medir la intensidad de fluorescencia del ámbar amarillo traslucido**

L. Nuñez, R. Mota J. Camas, R. Grajales, M. Pérez

**50 Co-Simulación en un Robot Scara con Gripper Subactuado**

H. León, M. Pérez

**52 Obtención de un modelo termoplástico, aprovechando la ceniza de la biomasa proveniente del despulpado del cacao y el reciclaje de PET, mediante un horno compresor automatizado con Software LabView y Hardware Arduino**

Arly Darío Rincón-Quintero, Alexander Meneses-Jácome,  
Luis Alfonso del Portillo-Valdés, Johan Fabián Santander-Rivera,  
Jainer Enrique Lizcano-Espinel, Sergio Mauricio Amado-Morales

**83 Sistema de control gestual para aplicación en robótica**

Arnoldo Fernández Ramírez, Alberto Daniel Echeverría Pérez, Roxana García Andrade,  
Armando Martínez Reyes, Ernesto Rincón Martínez

**85 Diseño y Simulación de Sistema Robótico para Manipulación Utilizando Animación por Computador**

Arnoldo Fernández Ramírez, Macías Solís José Francisco,  
Alberto Daniel Echeverría Pérez, Roxana García Andrade, Armando Martínez Reyes,  
C. Hernández-Santos

**92 Control de un Brazo Robótico de 3 grados de libertad en Matlab GUIDE**

J. Tenorio Tapia, J. G. Cebada Reyes, A. Michua Camarillo

Sistemas de Comunicación Cap. V

**25 Metrología de la red de sensores inalámbricos y del sensor de vibración aplicados al monitoreo de la torre de transmisión eléctrica para pérdidas no-técnicas**

M.H. Cruz-Díaz, C.F. García-Hernández, J. Meneses-Ruiz, J.C. Velázquez-Hernández,  
M. Sánchez-Brito

**51 On the Monte Carlo Simulation to Evaluate the GPSR performance**

José Luis Sánchez Chacón, J. Castañeda-Camacho,  
José Miguel Hurtado Madrid, L-Cortez, Marcelino Luis Guadalupe

Gestión de la Tecnología en la Industria y Educación Cap. VI

**2 Ontología informática y gestión de conocimiento en la empresa de investigación mexicana**

A. Sánchez Ramírez

**15 Desarrollo inicial del modelo de formación dual universitario de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes**

G. Brianza, F. A. Villa, C. I. Rodríguez, J. E. Luévano

**38 Prueba de usabilidad para la evaluación del prototipo de audio para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes de 10 a 25 años de edad del Valle de Teotihuacán**

Bustamante, A., Esquivel, S., González, N., Peña, C., Gutiérrez, L.

**39 Estudio de factibilidad para un prototipo de sistema embebido multimedia en la enseñanza del idioma inglés para niños de 5 a 12 años**

Bustamante, A., González, N., Esquivel, S., Ramos, J., Briseño R.

**40 Análisis de viabilidad en la implementación del modelo de un servidor FTP para protección de la información y la mejora de los procesos académicos y administrativos**

Bustamante, A., González, N., Esquivel, S., Luna, J., Romero B.

**43 Estudio previo de los factores que han deteriorado de la zona arqueológica de Teotihuacán para el desarrollo software multimedia como herramienta de preservación del patrimonio cultural**

Bustamante, A., Esquivel, S. González, N. Martínez, R.

Gestión de la Tecnología en la Industria y Educación Cap. VI

**59 Descripción Cartográfica del Municipio de Santa Catarina Juquila, Oaxaca, México**

José Mariano Mijangos Zetina, Hirvin Gorospe Zetina, Rodolfo Campos Tenorio

**80 Desarrollo de herramienta educativa para el cuidado de plantas o árboles frutales mediante cómputo afectivo**

R. Romero, J.E. Romero, J. H. Puebla

**84 Arquitectura Serverless implementada en la creación de un servicio web para una aplicación móvil en un ambiente de producción**

F. Ramírez-Felipe, A. P. Oliva-Villa

Nuevas Tecnologías Cap. VII

**19 Prototipo optomecatrónico para medir índice de refracción de líquidos transparentes**

C. Castellanos, J. Camas, R. Grajales, M. Pérez, C. Ríos, J. Gómez

**48 Desarrollo de un videojuego para ayudar a la rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas en menores**

D. Grande, D. Morales

**53 In the Quest for Random Signals**

R. Armenta, A. Sotelo, Paul A. Valle, Luis N. Coria

**87 Sistema de Apoyo al Diagnóstico de Cardiopatías Basado en Envelopograma Fonocardiográfico Promedio**

J. C. Colin-Ortega, H. Girón-Nieto, C. M. Merino-Arroyo

**88 Radiative Warming Capability Characterization of an Infrared Emitter for Biomedical Purposes**

J. C. Colin-Ortega, J. P. Miselem, R. J. Alcazar-Olan, C. M. Merino-Arroyo

- 11 Algoritmo de control para la detección de colisión de una pinza robótica**  
A. Izaguirre, C. Navarro, N. Rodríguez
- 33 Evaluación de corte fino de chapa metálica de acero AISI 1023 utilizando método de elemento finito**  
F.A. Villa, N.A. Rángel, C. I. Rodríguez
- 34 Nodo Sensor/Actuador para Sistema de Gestión de Energía para Edificios**  
J.Hoyo-Montaño, D.Espejel-Blanco, J.Enriquez-Rojas, R.Galaz-Bustamante
- 35 Análisis y validación estructural como estrategia para consolidación de producto**  
Pedro Ojeda
- 36 Aplicación de Bombas Sumergibles de Acero Inoxidable 316 en Ambientes Corrosivos**  
A. Torres-Yáñez, M. A. Rivera-Hernández, S. Cruz-López, J.A. Vázquez-Feijoo, G. UrriolagoitiaSosa, E. A. Merchán-Cruz, G.M. Urriolagoitia-Calderón
- 54 Predicción de fallas en redes de telecomunicaciones usando métodos de inteligencia artificial**  
F. Tapia, H. Carrillo
- 57 Diseño e Implementación de Alarmas Andon en Áreas Específicas en Smeltek S.A De C.V. Aguascalientes**  
B. Téllez, A.F. Monroy, G. Brianza
- 63 Uso de árboles de decisión para la detección de plagas y enfermedades en los cultivos de aguacate en México**  
M. E. López Pérez, L. F Columna Álvarez, G. M. Ojeda Pérez
- 72 Proceso de manufactura aditiva de prótesis de extremidades superiores por medio de DFMA**  
T. M. Meneses, Y. Gonzalez, A. Bautista, F. Orozco
- 81 Implementación de un modelo computacional para estimar el porcentaje de porosidad en materiales sólidos**  
M.R. Ortiz-Alvarez, S. Polanco-Martagón, E. Rocha-Rangel, J.A. Rodríguez-García

**4 Control de carga de baterías para una plataforma robótica móvil aplicando lógica difusa**

R. Vazquez, I. Herrera, G. Aguila, O. Sandoval, A. Martínez

**7 Construcción de software, utilizando metodologías ágiles, para el registro y control virtual del acceso de motocicletas al parqueadero de la Universidad de Cundinamarca, Colombia**

R. Rodríguez, D. Bustos y F. Lanza

**10 Implementación de red neuronal en microcontrolador para la detección de números**

C. A. Navarro, A. Izaguirre, N. A. Rodriguez

**32 Transcripción Automática de Batería con Redes Neuronales Convolucionales Cerradas y Función de Costo Focal**

M. Pessat, T. Nakashika, H. Perez-Meana, M. Nakano

**49 Sistema de control de lanzador de balones manipulado a distancia**

J. Reyes, G. A. Ramírez

**62 Control difuso para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil de tracción tipo Ackermann**

R. Olivera, E. Escobar, S. Velazquez, M. Pérez, H. Hernandez, R. Carrillo, I. Escobar, J. Cruz

**68 A 2.5D Visual Servoing Control for a 6DoF Manipulator**

Ludivina Facundo, Arturo Baltazar, Chidentree Treesatayapun

**82 Control Difuso de Velocidad de una Turbina Eólica**

G. Zubeldía, R. Garduño, M. Borunda y M.A. Hernández

**93 Simulación del viento en Realidad Virtual con Autómatas Celulares**

R. Pool-Canul, A. Salcido, G. Santamaría-Bonfil

**6 A Convex Formulation for Optimal Power Factor Correction in Power Electronic Converters for Photovoltaic Applications**

Alexander Casilimas Peña, Alejandro Garcés y Oscar Danilo Montoya

**21 Aplicación de Técnicas computacionales para el Estudio del Flujo de Energía en Forma de Calor en Habitaciones**

R. E. Lilly-Velázquez, G. E. Ovando-Chacon, S. L. Ovando-Chacon, J. C. Prince-Avelino, A. Rodríguez-León

**46 Análisis de fatiga de la interacción fluido-estructura de un rotor de un generador eólico**

Zeatti F. Mayra K., Castro G. Laura L.

**56 Diseño hidráulico del rodete de una turbina horizontal de flujo axial para generar 5kw**

R. Gómez-Mejía, A.R. Torres-García, G. Urriolagoitia-Sosa, B. Romero-Ángeles, G. Urriolagoitia-Calderón

# On Convex Power Flow Analysis in DC Resistive Networks with Voltage-Dependent Load Models

Oscar Danilo Montoya  
Program of Electrical and Electronic Engineering  
Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB)  
Post code: 131001, Cartagena, Colombia  
E-mail: o.d.montoyagiraldo@ieee.org

A. Casilimas-Peña, W. Gil-González and A. Garcés  
Department of Electric Power Engineering  
Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)  
AA: 97 - Post code: 660003  
Email: {acasilimas,wjgil,alejandro.garces}@utp.edu.co

**Abstract**—This paper addresses the problems of power flow and optimal power flow analysis considering voltage-dependent load models from the convex point of view. First, Taylor series expansion method is employed for linearizing the power flow equations generating a set of affine hyperplanes. Second, the sequential quadratic programming (SQP) approach is employed for adjusting the linearization point to eliminate the voltage estimation error between the exact and proposed convex models recursively. Two voltage-dependent load models are considered in our power flow and optimal power flow proposals which based on the exponential and polynomial models. General algebraic modeling system (GAMS) and its nonlinear optimization packages are employed for comparison purposes. Two DC-test systems with 6 and 21 nodes are used to validate the performance of the SQP proposed. The proposed SQP approach is implemented in MATLAB software with quadprog toolbox.

**Index Terms**—Direct-current networks, optimal power flow analysis, sequential quadratic programming, Taylor's based series expansion method.

## I. INTRODUCTION

ANALYSIS of direct-current (DC) networks have become into an important topic in specialized literature due to the speed advances of power electronics, renewable generation and energy storage technologies [1], [2]. The development of efficient DC-DC converters allow building power systems operating under DC paradigm that permits easier controllability (voltage control) since classical controls such as reactive power or frequency in alternative-current networks are not applicable to DC grids [3], [4]. The study of the DC networks can be focused on dynamical analysis (time domain simulation) [5] or static analysis (steady-state simulation) [1]. The dynamical analysis focuses on the development of linear and nonlinear control strategies to operate the DC-DC converters (buck, boost and cuk, etc.) for improving transient characteristic in the DC grid such as voltage drops and dips or reducing power oscillations caused by the stochasticity of renewable generation [6]–[8]; The second approach focuses on power flow and an optimal power flow analysis to improve technical, economical or even environmental characteristic of the network by applying optimization techniques [9]. In this paper,

This work was supported in part by the Administrative Department of Science, Technology and Innovation of Colombia (COLCIENCIAS) through the National Scholarship Program under Grant 727-2015 and in part by the Universidad Tecnológica de Bolívar under Project C2018P020.

we concentrate on analyzing DC grids with different voltage levels (transmission and distribution levels) from the static analysis.

In specialized literature, multiple power flow analysis for addressing DC power grids have been proposed, such as the classical Gauss-Seidel [4], Newton-Raphson [10] numerical methods as well as successive approximations [11], Taylor's based iterative methods or linear approximations [3], [12]; in the case of optimal power flow analysis, have been proposed formulations based on second order cone and semidefinite programming [13]–[17] as well as quadratic convex models and sequential quadratic programming approaches based on Newton-Raphson, Taylor's series expansion and voltage current approaches [9], [18]. The common denominator in these works is the consideration of the load behavior as constant power consumption without analyzing the voltage dependence on those demands, which is identify as a research gap in specialized literature that this paper tries to fulfill.

The main contribution in this paper, is the possibility of including voltage-dependent load models in power flow analysis for DC networks. These voltage-dependent loads models correspond to the exponential and polynomial representation of the power consumptions [19], [20]. These models add strong non-linearities of the power balance equations. To address these non-convexities, we proposed a recursively Taylor's based series expansion method for transforming the OPF problem into a sequential convex programming problem [9]. Numerical results show that the exact nonlinear and the proposed convexification approaches reach the same optimal solutions which confirm the excellent behavior of the SQP approaches for analyzing DC systems.

The remainder of this paper is organized as follows: Section II presents the power flow modeling considering exponential and polynomial models for analyzing power consumption. Section III describes Taylor's series expansion method and its application to the power flow analysis including different voltage-load models. Section IV presents the proposed SQP approach for solving the proposed convex model. In section V the main characteristics of the test systems are presented; followed by the computational implementation and results' analysis in Section VI. Lastly, the main conclusions derived from this work are presented in Section VII.

## II. POWER FLOW MODELING

This section presents the formulation of the power flow and optimal power flow problem in DC networks considering two voltage-dependent load models well-known as exponential and polynomial models.

### A. Power Flow Equations

The formulation of the power flow equations in a DC network corresponds to the application of the Kirchhoff's laws by using the voltage nodal method in conjunction to the first Tellegen's theorem to each node contain in the set of nodes  $\mathcal{N}$  [12]; In addition, all of these nodes are interconnected between the at least by a tree configuration without isolated areas [4]. This interconnection is defined by the conductance matrix  $G$ , where  $G_{ij}$  is the  $ij^{th}$  component of the conductance's matrix, respectively. Power flow equations for a DC grid can be written as

$$p_{gi} - p_{di}(v_i) = v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} v_j \quad \forall i \in \mathcal{N}; \quad (1)$$

where  $p_{gi}$  is the power generation at the node  $i$  and  $p_{di}(v_i)$  represents the power consumption, which depends on the voltage at its own node, i.e.,  $v_i$ . Observe that  $n$  is the total number of nodes of the DC grid.

When the power consumption depends on the voltage profile at its node, then it can be formulated in exponential or polynomial forms as presented below [19]:

$$p_{di}(v_i) = p_{0i} \left( \frac{v_i}{v_{nom}} \right)^{\alpha_i}; \quad (2a)$$

$$p_{di}(v_i) = p_{0i} \left[ a_i \left( \frac{v_i}{v_{nom}} \right)^2 + b_i \left( \frac{v_i}{v_{nom}} \right) + c_i \right]; \quad (2b)$$

where  $p_{0i}$  is the base power consumption at node  $i$  (i.e., classical constant power load);  $v_{nom}$  represents the nominal voltage of the DC network and  $\alpha_i$  denotes the exponential coefficient in the voltage-dependent load model with exponential structure [20]. In addition,  $a_i$ ,  $b_i$  and  $c_i$  correspond to the coefficients of the polynomial load model which is widely known in specialized literature as ZIP (impedance-current-power) model<sup>1</sup>. Note that  $a_i + b_i + c_i = 1$  and  $a_i, b_i, c_i \in \mathbb{R}_+$ ,  $\forall i \in \mathcal{N}$ .

Power flow formulation is completed when any of those voltage-dependent load models (2a) for exponential model or (2b) for polynomial modeling are substituted on general power flow expression given in (1) [19].

### B. Optimal Power Flow Formulation

Optimal power flow is an optimization process that tries to improve technical, economical or even environmental aspects in power systems [18]. The most common OPF model tries to minimize the total power losses produced by the resistive effects in all branches of the network [9]. A complete formulation of the OPF model for DC grids is presented below

<sup>1</sup>both models are equivalent if  $a_i = 1$ ,  $b_i = c_i = 0$  and  $\alpha_i = 2$  or  $a_i = c_i = 0$ ,  $b_i = 1$  and  $\alpha_i = 1$  or  $a_i = b_i = 0$ ,  $c_i = 1$  and  $\alpha_i = 0$ .

### Objective function

$$\min p_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} v_i v_j; \quad (3)$$

### Set of constraints

$$p_{gi} - p_{di}(v_i) = v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} v_j \quad \forall i \in \mathcal{N}; \quad (4)$$

$$p_{gi}^{\min} \leq p_{gi} \leq p_{gi}^{\max} \quad \forall i \in \mathcal{N}; \quad (5)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \quad \forall i \in \mathcal{N}; \quad (6)$$

where  $p_{gi}^{\min}$  and  $p_{gi}^{\max}$  are the minimum and maximum power generation capabilities at the voltage controlled nodes; while  $v_i^{\min}$  and  $v_i^{\max}$  correspond to the voltage lower and upper bounds, respectively.

It is important to mention that (4) is composed by convex and non-convex equations. i.e., the subset of equations associated with the voltage controlled nodes are convex [3]; while the subset of voltage-dependent load models remains being non-convex. In this sense, expression (4) can be split as follows

$$p_{gi} = v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} v_j \quad \forall i \in \mathcal{S}; \quad (7a)$$

$$p_{dgi} - p_{di}(v_i) = v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} v_j \quad \forall i \in \mathcal{N} - \mathcal{S}; \quad (7b)$$

where  $p_{dgi}$  is a possible power generator located at node  $i$  without voltage control capability, i.e., distributed generation; while  $\mathcal{S}$  represents the set of voltage controlled nodes.

Note that for solving the power flow problem numerical methods are required (e.g., Gauss-Seidel [4], Newton-Raphson [10], successive approximations [11] or linear equivalents [3]). In the case of the OPF model are needed nonlinear optimization techniques such as semidefinite programming [14], second-order cone programming [13] or SQP formulations [9], among others. For this reason, this research proposed a new SQP model for power flow analysis based on Taylor's series expansion including voltage-dependent load models, which has not been previously evidenced in specialized literature for DC grids.

## III. TAYLOR'S SERIES EXPANSION METHOD

To analyzes, nonlinear problems even for control or optimization approaches around desired and well-known operative points most of the times have recurred to Taylor's series expansion approach [21]. Here, we use this method to obtain a linear equivalent representation of the power flow equations as previously proposed in [9] and [11] for analyzing constant power loads in DC networks.

In general terms, to approximate a nonlinear continuous and soft function  $f(x)$  around of  $x_0$  via Taylor's series expansion, then, it can be formulated

$$f(x) = f(x_0) + \frac{d}{dx} f_{x_0} (x - x_0) + \mathcal{O}(x, x_0), \quad (8)$$

where  $\frac{d}{dx} f_{x_0}$  is the derivative of the function  $f$  evaluated at  $x_0$  and  $\mathcal{O}(x, x_0)$  is the high order term of Taylor's series

expansion; Nevertheless, if the neighborhood of  $x_0$  is small, then, this term can be neglected due to its slight contributions, which is the case of the power flow analysis [18].

#### A. Linearization of the Voltage-Dependent Loads

Applying the linear expression (8) on the exponential and polynomial voltage-dependent loads given in (2a) and (2b) around  $v_{i0}$ , then, the following results are reached

$$p_{di}(v_i) \approx p_{0i} (1 - \alpha_i) \left( \frac{v_{i0}}{v_{nom}} \right)^{\alpha_i} + \frac{p_{0i} \alpha_i v_{i0}^{\alpha_i - 1}}{v_{nom}^{\alpha_i}} v_i; \quad (9a)$$

$$p_{di}(v_i) \approx p_{0i} \left( c_i - \frac{a_i v_{i0}^2}{v_{nom}^2} \right) + p_{0i} \left( \frac{2a_i v_{i0}}{v_{nom}^2} + \frac{b_i}{v_{nom}} \right) v_i; \quad (9b)$$

Note that (9a) is the linear approximation of the exponential voltage-dependent load model and (9b) is the linear approximation of the ZIP load model [12].

#### B. Linearization of the Power Flow Through the Lines

The right-hand-side of the power flow balance equation in (7b) is a nonlinear set of expressions conformed by-products between pairs of voltage variables. To linearize this equation in contrast to the conventional Newton-Raphson approach that uses the Jacobian matrix for this purpose, we proposed an alternative linearization as described below.

Suppose the nonlinear function  $f(x, y) = xy$  and the operative point  $(x_0, y_0)$ , which implies that if Taylor's series method is applied to this product of variables, then  $f$  can be approximated as

$$f(x, y) = xy \approx x_0 y + y_0 x - x_0 y_0. \quad (10)$$

In Fig. 1 is presented the maximum estimation error when the desired linearization point is selected as (1, 1) with 10% of maximum variations, i.e., ( $e = |xy - x - y - 1|$ ).

It is important to highlight that this graphic shows that the maximum error between the exact function and its linear approximation does not overpass 1%, which implies that the

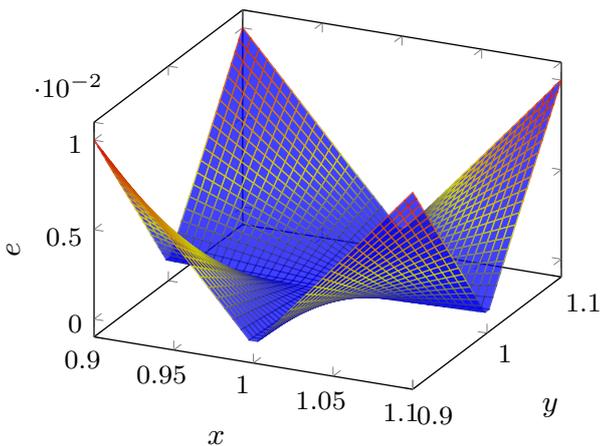


Fig. 1. Error behavior between the nonlinear and equivalent convex approximation of the product of two real and continuous variables around (1,1).

approximation via Taylor's series expansion is efficient for small variations around the linearization point.

Now, in the case of the right-hand-side of the power balance equation (7b), it can linearize considering (10) as follows

$$p_{dgi} - p_{di}(v_i) = \sum_{j=1}^n G_{ij} (v_{i0} v_j + v_{j0} v_i - v_{i0} v_{j0}) \quad \forall i \in \mathcal{N}; \quad (11)$$

In addition, if we consider  $p_{di}(v_i)$  as (9a) or (9b) in conjunction to (7a) and (11) a new linear power flow formulation for DC networks is reached which is different from those presented in [3] and [12]. Because, we considered two voltage-dependent load models and power flow through the branches are represented as convex hyperplanes, which it does not occur on those works. In addition, they use Newton-Raphson approaches or Taylor's series expansion methods to linearize the voltage profiles treated as hyperbolic constraints.

Finally, for optimal power flow analysis a convex quadratic optimization model is achieved as presented in **Model 1**.

**Model 1** (Quadratic convex approximation).

$$\begin{aligned} \min p_{loss} &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n G_{ij} (v_{i0} v_j + v_{j0} v_i - v_{i0} v_{j0}); \\ p_{gi} &= v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} v_j \quad \forall i \in \mathcal{S}; \\ p_{dgi} - p_{di}(v_i) &= v_i \sum_{j=1}^n G_{ij} (v_{i0} v_j + v_{j0} v_i - v_{i0} v_{j0}) \quad \forall i \in \mathcal{N} - \mathcal{S} \\ &\text{Eq. (9a) or (9b);} \end{aligned} \quad (12)$$

$$v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{N};$$

$$p_{gi}^{\min} \leq p_{gi} \leq p_{gi}^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{S};$$

$$p_{dgi}^{\min} \leq p_{dgi} \leq p_{dgi}^{\max}, \quad \forall i \in \mathcal{N} - \mathcal{S};$$

#### IV. PROPOSED SOLUTION METHOD

To reduce the possible estimation errors caused by the linearization of the power flow equations via Taylor's series expansion method, we adopted a recursive solution of the **Model 1** by using an SQP approach as previously presented in [9] for optimal power flow studies. Algorithm 1 describes the proposed recursive solution method.

#### V. TEST SYSTEMS

To verify the applicability of our convex formulation for power flow analysis in DC networks, we consider two DC systems with 6 and 21 nodes respectively. The first of them is typically in high-voltage DC (HVDC) analysis and the other one is mainly related to DC distribution networks. Their main characteristics are presented below.

**Data:** Define the DC grid, stopping criteria and maximum iteration parameters.

```

 $v_0 = 1;$ 
for  $t = 1 : t_{max}$  do
  Solve Model 1 using a quadratic optimizer package;
  Actualize  $v_t$ ;
  if  $|v_t - v_0| \leq error$  then
    Exact solution achieved;
    Result: Return  $v_t$  and  $p_{loss}$ .
    break;
  else
     $v_0 = v_t$ ;
    if  $t == t_{max}$  then
      An approximate solution was reached;
      Result: Return  $v_t$  and  $p_{loss}$ .
    end
  end
end

```

**Algorithm 1:** Recursive solution for the **Model 1** for eliminating estimation errors between the exact nonlinear model and the proposed convex method

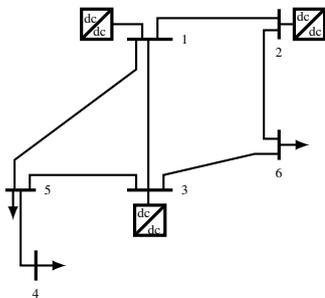


Fig. 2. Six-node HVDC system

TABLE I  
PARAMETERS OF THE SIX TERMINALS HVDC SYSTEM PROPOSED BY THE CIGRE-B4 WORKING GROUP

Line parameters					
From	To	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]	From	To	$R_{ij}$ [ $\Omega$ ]
1	5	5.70	3	6	4.75
5	3	2.28	1	2	1.90
5	4	1.71	2	6	1.90
1	3	2.28	—	—	—
Load consumptions					
Node	$P_0$ [MW]	Node	$P_0$ [MW]	Node	$P_0$ [MW]
4	1500	5	1250	6	950

#### A. 6-node HVDC System

The 6-node HVDC System was originally proposed in [22] for transient analysis of HVDC systems and, its configuration is depicted in Fig. 2 while the line parameters and load consumptions are presented in Table I.

For this test system we assume that there are generators at nodes 1, 2 and 3 with power generation capabilities of 1500 MW, 2000 MW and 1800 MW, respectively. In addition,

TABLE II  
POWER LOSSES PERFORMANCE FOR THE 6-NODE HVDC SYSTEM WITH EXPONENTIAL AND POLYNOMIAL LOAD MODELS [MW]

Exp. $\alpha$	GAMS	quadprog	ZIP ( $a, b, c$ )	GAMS	quadprog
0.0	120.5538	120.5538	(0, 0, 1)	120.5538	120.5538
0.5	115.1497	115.1497	(0, 1, 0)	110.2870	110.2870
1.0	110.2870	110.2870	(1, 0, 0)	101.8054	101.8054
1.5	105.8620	105.8620	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$	110.4195	110.4195
2.0	101.8054	101.8054	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{2}{3})$	115.2798	115.2798

this system operates with 400 kV and we select node 2 as voltage controlled node by defining its output voltage equal to the nominal value.

#### B. 21-node Test System

This test system is an adaptation of the 21-node test system presented in [3], [10]. We only consider one voltage controlled source located at node 1 which is set as 1.0 p.u., and three distributed generators at nodes 9, 12 and 18, which can be dispatched from 0 to 1.5 p.u. each one. The test system configuration and parameters can be consulted in [18]. In addition, 1 kV and 100 kW are considered as voltage and power bases, respectively.

## VI. COMPUTATIONAL VALIDATION

The simulations were carried out in a desk-computer with an INTEL(R) Core(TM) i5 – 3550 processor at 3.50 GHz, 8 GB RAM, running a 64-bits Windows 7 Professional operating system. The General Algebraic Modeling System (GAMS) is used for solving the exact nonlinear non-convex power flow models given from (3) to (6) considering voltage-dependent models (2a) and (2b), and compare their results with the proposed convex model (12). The solution of this convex model following the strategy presented in Algorithm 1 is made via MATLAB software with the quadprog toolbox.

#### A. 6-node HVDC System

In Table II has presented the numerical performance of the exact and convex proposed model for solving OPF problems in HVDC systems. Note that the proposed SQP model reaches the same numerical solution provided by the GAMS optimization package with estimation errors lower than  $1 \times 10^{-6}\%$ ; which confirms the efficiency and accuracy of our convex proposal. Note that the SQP method only takes 5 iterations for eliminating the errors introduced in the OPF modeling when Taylor's series expansion is used for achieving a linear equivalent model [22].

It is also important to highlight that the exponential and polynomial voltage-dependent load models are equivalents since the extreme values of the power losses concur for both models, i.e., 120.5538 MW and 101.8054 MW as maximum and minimum power losses, respectively.

<sup>2</sup>For simplicity we show only the first four decimals in Table I.

### B. 21-node Test System

In Table III has listed the power losses behavior for the 21-node test feeder considering voltage-dependent load models. Note that those results confirm the numerical performance exhibited in the 6-node HVDC system; since both load models concur in the maximum and minimum power losses, i.e., 3.1922 kW and 3.0664 kW as maximum and minimum power losses, respectively. In addition, those results also confirm that the exact nonlinear non-convex models solved in GAMS and the proposed SQP convex model reach the same numerical solution with estimation errors lower than  $1 \times 10^{-6}\%$ , which is achieved by our proposed approach after 5 iterations of the Algorithm 1.

In Fig. 3 is presented the voltage profile performance of all nodes of this test system for the cases that the polynomial and exponential models concur perfectly (see Table III); which show that only there are small variations between the extreme load behaviors, viz., loads that changes from constant power to constant impedance ( $\alpha = 2 \rightarrow Z$ ,  $\alpha = 1 \rightarrow I$  and  $\alpha = 0 \rightarrow P$ ). Finally, it is important to say that any possible voltage profile for the polynomial and exponential load models in the 21-node test feeder will be contained in the strip shown in Fig. 3, which is defined from  $\alpha = 0$  to  $\alpha = 2$ .

### VII. CONCLUSION

A convex optimal power flow formulation for DC networks has been proposed in this paper via Taylor's series expansion method by- considering voltage-dependent load models as the main novelty. To eliminate the estimation errors between the exact and the proposed convex model a sequential quadratic programming model was adopted. Simulation results confirmed that the exponential and polynomial load models are equivalents since all the spectra of power losses are fidelity representing by adjusting their parameters, i.e.,  $\alpha$  and  $a$ ,  $b$  and  $c$ . As future work, it will be possible to use this convex OPF model for operating energy storage systems in

TABLE III  
POWER LOSSES PERFORMANCE FOR THE 21-NODE TEST SYSTEM WITH  
EXPONENTIAL AND POLYNOMIAL LOAD MODELS [kW]

Exp. $\alpha$	GAMS	quadprog	ZIP ( $a, b, c$ )	GAMS	quadprog
0.0	3.1922	3.1922	(0, 0, 1)	3.1922	3.1922
0.5	3.1602	3.1602	(0, 1, 0)	3.1286	3.1286
1.0	3.1286	3.1286	(1, 0, 0)	3.0664	3.0664
1.5	3.0973	3.0973	$(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3})$	3.1289	3.1289
2.0	3.0664	3.0664	$(\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{3})$	3.1605	3.1605

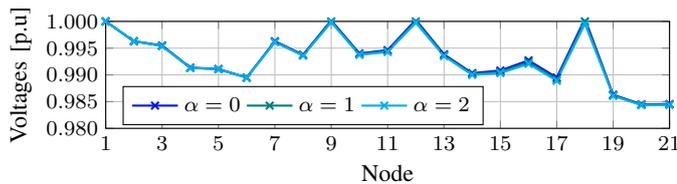


Fig. 3. Voltage profile in the 21-node test system for different load conditions

DC networks for day-ahead economic dispatch by considering multiple scenarios of load modeling, in order to differ among residential, commercial and industrial consumers.

### REFERENCES

- [1] J. W. Simpson-Porco, F. Dorfler, and F. Bullo, "On Resistive Networks of Constant-Power Devices," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 62, no. 8, pp. 811–815, Aug 2015.
- [2] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the art in research on microgrids: A review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015.
- [3] O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, D. González-Montoya, C. Ramos-Paja, and A. Garces, "Linear power flow formulation for low-voltage DC power grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 163, pp. 375 – 381, 2018.
- [4] A. Garces, "Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, no. Supplement C, pp. 149–153, 2017.
- [5] N. Barabanov, R. Ortega, and R. G. B. Polyak, "On existence and stability of equilibria of linear time-invariant systems with constant power loads," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 63, no. 1, pp. 114–121, Jan 2016.
- [6] D. Karimipour and F. R. Salmasi, "Stability Analysis of AC Microgrids With Constant Power Loads Based on Popov's Absolute Stability Criterion," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, vol. 62, no. 7, pp. 696–700, July 2015.
- [7] M. Su, Z. Liu, Y. Sun, H. Han, and X. Hou, "Stability analysis and stabilization methods of dc microgrid with multiple parallel-connected dedc converters loaded by cpls," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 132–142, Jan 2018.
- [8] Y. Gu, W. Li, and X. He, "Passivity-based control of dc microgrid for self-disciplined stabilization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 5, pp. 2623–2632, Sep. 2015.
- [9] O. D. Montoya, W. Gil-González, and A. Garces, "Sequential quadratic programming models for solving the OPF problem in DC grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 169, pp. 18 – 23, 2019.
- [10] A. Garces, "On Convergence of Newtons Method in Power Flow Study for DC Microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–1, 2018.
- [11] O. D. Montoya, V. M. Garrido, W. Gil-González, and L. Grisales-Noreña, "Power Flow Analysis in DC Grids: Two Alternative Numerical Methods," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, pp. 1–1, 2019.
- [12] O. D. Montoya, "On Linear Analysis of the Power Flow Equations for DC and AC Grids with CPLs," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, pp. 1–1, 2019.
- [13] J. Li, F. Liu, Z. Wang, S. Low, and S. Mei, "Optimal Power Flow in Stand-alone DC Microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–1, 2018.
- [14] W. Gil-González, O. D. Montoya, E. Holguín, A. Garces, and L. F. Grisales-Noreña, "Economic dispatch of energy storage systems in dc microgrids employing a semidefinite programming model," *Journal of Energy Storage*, vol. 21, pp. 1 – 8, 2019.
- [15] O. D. Montoya, "Numerical Approximation of the Maximum Power Consumption in DC-MGs with CPLs via an SDP Model," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, pp. 1–1, 2018.
- [16] S. Bahrami, F. Therrien, V. W. S. Wong, and J. Jatskevich, "Semidefinite Relaxation of Optimal Power Flow for ACDC Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 1, pp. 289–304, Jan 2017.
- [17] M. Baradar, M. R. Hesamzadeh, and M. Ghandhari, "Second-Order Cone Programming for Optimal Power Flow in VSC-Type AC-DC Grids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4282–4291, Nov 2013.
- [18] O. D. Montoya, W. Gil-González, and A. Garces, "Optimal Power Flow on DC Microgrids: A Quadratic Convex Approximation," *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, pp. 1–1, 2018.
- [19] H. Yuan, F. Li, H. Cui, X. Lu, D. Shi, and Z. Wang, "A measurement-based VSI for voltage dependent loads using angle difference between tangent lines of load and PV curves," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 160, pp. 13 – 16, 2018.
- [20] J. R. Martí, H. Ahmadi, and L. Bashualdo, "Linear Power-Flow Formulation Based on a Voltage-Dependent Load Model," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 28, no. 3, pp. 1682–1690, July 2013.

- [21] Z. Li, J. Yu, and Q. H. Wu, "Approximate Linear Power Flow Using Logarithmic Transform of Voltage Magnitudes With Reactive Power and Transmission Loss Consideration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4593–4603, July 2018.
- [22] C. Gavriluta, I. Candela, C. Citro, A. Luna, and P. Rodriguez, "Design considerations for primary control in multi-terminal VSC-HVDC grids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 122, pp. 33 – 41, 2015.

**Oscar Danilo Monotoya** Received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D degrees in Electrical Engineering from Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, in 2012, 2014 and 2019, respectively. He is currently working as an assistant professor at the Electrical Engineering program at Universidad Tecnológica de Bolívar. His research interests include mathematical optimization, planning and control of power systems, renewable energy, energy storage, protective devices, passivity-based control, and dynamical analysis.

**Alexander Casilimas** received the Bachelor degree in electrical engineering from Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia, in 2016. He is currently master student at UTP. His research interest include renewable energies, power electronics, power quality and mathematical optimization.

**Walter Gil-González** received the B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from Technological University of Pereira, Pereira, Colombia, in 2011 and 2013, respectively, where he is currently working toward the Ph.D. degrees. His research is focused on the control and stability of power systems. In addition, other areas of research interest are optimization and operation of the power system.

**Alejandro Garcés** (M04, SM'15) Received the Bachelor and Master degree in electrical engineering from the Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia in 2006, and the Ph.D. degree from the Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), Norway, in 2012. He is currently Professor in the Department of Electric Power Systems at UTP. His research interests include renewable energies, mathematical optimization, power system dynamics and HVDC transmission.

# Diagnóstico Inteligente de Parques Eólicos

P.H. Ibargüengoytia, U.A. García, A. Reyes Ballesteros

Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Control, Electrónica y Comunicaciones  
pibargu@gmail.com, {uriel.garcia, areyes}@ineel.mx

**Resumen**—Diagnóstico se refiere al problema de identificar la falla de un sistema observando los síntomas que se presentan. Computacionalmente, esto se logra al comparar el comportamiento de un sistema con el comportamiento esperado generado por un modelo. Se presenta en este artículo el desarrollo de un sistema de diagnóstico inteligente para parques eólicos, **DxPQ** basado en modelos de comportamiento. El sistema se desarrolló utilizando un simulador de parque eólico también desarrollado por este grupo de trabajo. El sistema fue probado utilizando dos parques simulados. El primero es el Centro Experimental de Tecnología Eólica (CERTe), del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), en el estado de Oaxaca en México. El segundo parque es Villonaco en república del Ecuador. Este artículo describe los resultados experimentales al utilizar el simulador en experimentos con y sin fallas en los parques eólicos.

*Palabras clave.* Inteligencia artificial, diagnóstico, parques eólicos, modelos de comportamiento.

## 1. Introducción

Existe una innegable necesidad de transición de generación eléctrica usando combustibles fósiles a la utilización de energías renovables. De éstas, una de las de más amplia integración es la utilización de la fuerza del viento o energía eólica. A manera de ejemplo, en México existen en 2018, 54 parques eólicos produciendo 4,935 Mega Watts por medio de 2,447 aerogeneradores. A nivel mundial, la energía eólica abastece 5-6% de los requerimientos de energía [1].

Para atender esta urgente necesidad de energía limpia, la Secretaría de Energía y el Conacyt crearon los Centros Mexicanos de Innovación en Energía (CEMIE) en modalidad Sol, Eólico y Geotérmico. El presente proyecto forma parte del consorcio del CEMIE-Eólico [2] que es liderado por el INEEL. El proyecto se refiere a la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial (IA) en el sector eólico.

Los parques eólicos son instalaciones costosas y complejas y requieren de sistemas de control y de diagnóstico que permitan la disponibilidad de los equipos en los mejores términos posibles. Un enfoque típico para hacer diagnóstico en cualquier sistema, y por supuesto de los parques eólicos, es crear modelos del sistema para comparar los resultados de la corrida en el modelo con la respuesta del sistema real. Si existe discrepancias entre las dos cantidades, entonces se presume la presencia de una falla. La principal diferencia entre los enfoques disponibles está en la forma de crear los modelos del sistema. En [3] los autores proponen un método para modelar el funcionamiento basado en ecuaciones de

paridad de variaciones no lineales de parámetros (NLPV por sus siglas en inglés) que consiste en estimar valores de parámetros en base al modelo y se compara con el funcionamiento real. Sin embargo, este método requiere la modelación del sistema en presencia de ciertas fallas a detectarse. En [4] se presenta un método extendido del diagnóstico de aerogeneradores para considerar las fallas a nivel parque. La idea consiste en considerar modelos sencillos de aerogeneradores y analizar las interacciones de cada uno de ellos con el resto del parque para detectar las fallas. Este método también requiere los modelos de las fallas presentes en los aerogeneradores y en el parque.

El sistema de diagnóstico de parques eólicos, **DxPQ**, presentado en este artículo es una extensión de las ideas desarrolladas en el diagnóstico de aerogeneradores [5], [6]. En ese trabajo, se propuso la creación de modelos del comportamiento normal de un aerogenerador (AG) y se desarrolló un método para detectar desviaciones a ese comportamiento normal.

Para el caso de diagnóstico de parques eólicos, se propone como modelo de comportamiento normal, el cálculo de la potencia teórica que cada aerogenerador (AG) del parque debe generar junto con la potencia teórica del parque completo. Esto se calcula en principio con los datos en línea de la velocidad y dirección del viento y las curvas de potencia características de cada AG. De ahí, se calculan las atenuaciones que se presentan dada la sombra de vientos que los AGs se puedan presentar debido a la dirección del viento y la organización de los AGs en el parque.

Este artículo se organiza como sigue. La sección siguiente describe el diagrama a bloques del sistema de diagnóstico con la explicación de los módulos que lo forman. La sección 3 explica los cálculos y los modelos de comportamiento propuestos para la detección de desviaciones a ese comportamiento normal. La sección 4 describe dos casos de estudio realizados con el sistema de diagnóstico y finalmente la sección 5 concluye este artículo y propone el trabajo futuro requerido para mejorar el sistema de diagnóstico.

## 2. Descripción del sistema de diagnóstico DxPQ

En la Fig. 1 se presenta un diagrama a bloques del sistema de software diagnóstico de parques eólicos (**DxPQ**). La entrada de datos está marcada a la izquierda del diagrama. La

entrada puede ser de “Datos históricos” o un enlace en línea del Sistema de Control Supervisorio y de Adquisición de datos (SCADA por sus siglas en inglés) del parque. En este trabajo se reporta el uso de un simulador y de un archivo de datos históricos como entrada.

El módulo “Configuración del sistema” se utiliza para agregar, eliminar, modificar y guardar información del parque, de los AGs y así también configurar la curva de potencia de cada tipo de AG a considerar en el parque. El módulo “Resultados de potencias” genera una salida de resultados a través de archivos \*.csv de manera automática. El “Módulo de Potencia Ajustada” y el “Módulo de Potencia Teórica” representan el modelo de comportamiento del parque correspondiente a las condiciones de velocidad y dirección del viento recibidas, ya sea del archivo de datos históricos o un enlace con el SCADA del parque. El módulo “Cálculo de Potencias” realiza la detección de desviaciones al comportamiento esperado de los AGs y del parque en general. La “IGU” es la parte principal de operación del sistema donde el usuario podrá interactuar de manera directa para configurar o visualizar resultados del diagnóstico de parques mediante despliegue de gráficos, botones o conjuntos de variables configurables.

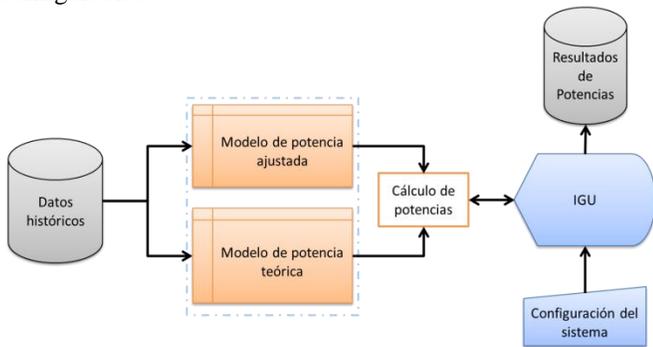


Fig 1. Diagrama a bloques del sistema DxPQ

### A. Configuración del sistema

El sistema de diagnóstico de parques eólicos requiere de un procedimiento de configuración que consiste en tres partes: configuración de parque, configuración de tipo de aerogeneradores y configuración de aerogeneradores

La Fig. 2 muestra de manera gráfica la configuración de parque en el cual se encuentra los siguientes datos de entrada

- Nombre del parque
- Ubicación
- Número total de aerogeneradores registrados
- Altura de los anemómetros instalados en la torre meteorológica de donde provienen los datos históricos del viento y su dirección.
- Valor del alfa fija el cual considera terrenos planos.

La Fig. 3 muestra de manera gráfica la configuración de tipo de aerogenerador en el cual se encuentra los siguientes datos de entrada:

- Nombre del tipo de aerogenerador según el fabricante
- Curva de potencia del aerogenerador
- Potencia nominal de operación del aerogenerador
- Velocidad de viento de arranque dado en m/s
- Velocidad de viento de paro dado en m/s
- Altura de rotor en metros
- Radio del rotor en metros

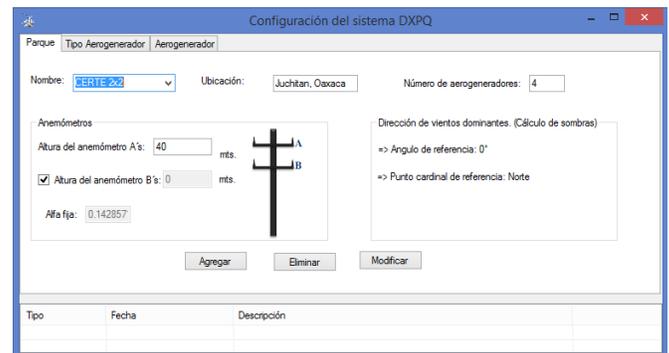


Fig. 2 Configuración del parque

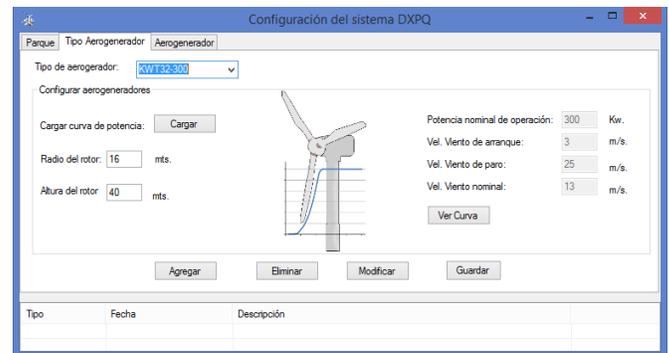


Fig. 3. Configuración del tipo de AG

La Fig. 4 muestra de manera gráfica la configuración de aerogeneradores en el cual se encuentra los siguientes datos de entrada

- Nombre del parque donde pertenecen los AGs
- Total de aerogeneradores
- Tipo de aerogenerador según el fabricante
- Actividad del aerogenerador
- Posición geográfica de cada aerogenerador

La siguiente sección describe los procesos de cálculos de potencias para la definición del diagnóstico.

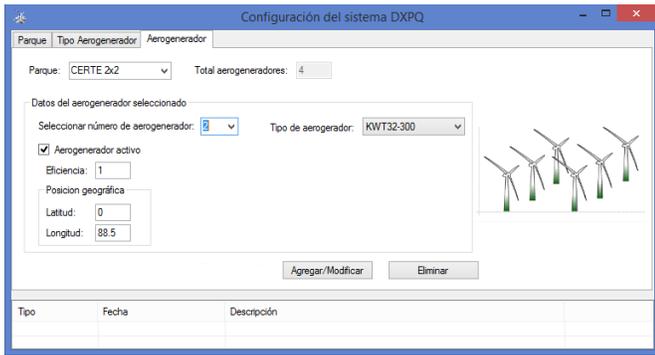


Fig. 4 Configuración del AG

### 3. Modelo de comportamiento de parques

En esta sección se describe la formación del modelo de comportamiento de parques eólicos que utiliza el sistema de diagnóstico **DxpQ**. Está formado básicamente por el cálculo de las siguientes potencias tanto por aerogenerador como por el parque completo: i) potencia teórica, ii) potencia ajustada y iii) potencia real.

#### A. Potencia teórica

La potencia teórica se calcula con la interpolación en la curva de potencia que proporciona el fabricante de cada AG. Esta curva relaciona la potencia que puede proporcionar un AG en base a la velocidad de viento recibida. En la Fig. 5 se muestra una curva típica de un AG de 800 KW. Nótese que la generación comienza al recibir 4 m/seg de viento, alcanza su potencia nominal cerca de los 12 m/seg y por protección, la turbina se dispara a los 25 m/seg para evitar se dañe en vientos fuertes como los huracanes.

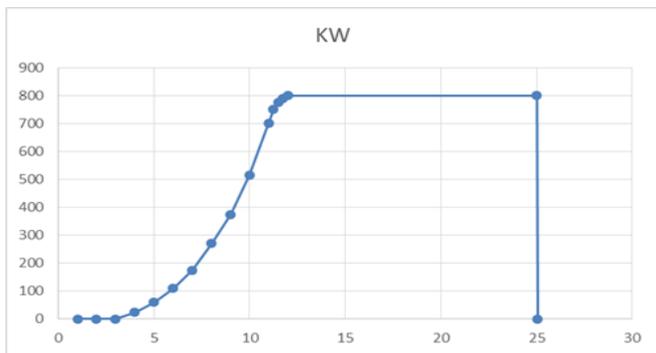


Fig. 5 Curva de potencia típica de un AG de 800 KW

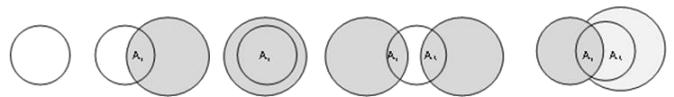
A manera de ejemplo, si se presenta una velocidad de viento de 10 m/seg, según la interpolación, la potencia teórica es de 500 KW en esta máquina de 800KW.

#### B. Potencia ajustada.

La potencia ajustada se refiere a la pérdida de potencia debido a las sombras que se pueden hacer los AGs en ciertas direcciones de viento. Normalmente se diseña un parque considerando la dirección predominante del viento según estudios meteorológicos del lugar por varios años. Sin embargo, en cambios de dirección, los AGs se pueden hacer sombra de viento. La Fig. 6 muestra los cinco casos de sombras que se pueden presentar en un parque.

- Sin sombra, ya sea porque está ubicado en un sitio extremo de acuerdo con la dirección del viento, o porque ningún otro AG le hace sombra.
- Sombra parcial, existe una disminución del viento que recibe el AG parcialmente sombreado por lo que su potencia generada también disminuye.
- Sombra total, cuando dos AGs están alineados en la dirección del viento. El AG posterior recibe una disminución máxima de viento.
- Dos sombras parciales, cuando la sombra existe por dos AGs frente a un tercero en la dirección del viento.
- Una sombra parcial y una total, similar al anterior pero uno de los AGs del frente presenta una sombra total.

Para calcular el efecto de las sombras, se utilizó el modelo reportado por Attias y Ladani en [7]



a) Sin sombra b) Sombra parcial c) Sombra total d) Dos parciales e) parcial y una total

Fig. 6. Sombras que se pueden presentar en los aerogeneradores

#### C. Potencia real medida

La potencia real se refiere a la potencia medida y reportada por los sistemas SCADA de los AGs y del parque en general.

Utilizando la potencia teórica y la ajustada como modelo del comportamiento del parque, se puede calcular el comportamiento, es decir, la potencia que debe presentar el parque. Para esto, el sistema de diagnóstico calcula en línea la potencia ajustada dependiendo de la velocidad y dirección del viento. Para hacer ese cálculo se utiliza la rosa de la sombra de los vientos.

#### D. Rosa de la Sombra de los vientos

La Fig. 8 muestra la rosa de la sombra de los vientos para un AG en específico. La figura muestra la rosa de los vientos con graduación de cada 5 grados. Los círculos concéntricos muestran el factor por el que se debe multiplicar la potencia teórica para obtener la potencia ajustada. Nótese que al centro se multiplica por cero y en la periferia por uno. Esto significa que si hubiera una sombra total sin siquiera turbulencia, el AG afectado no tendría viento para mover sus aspas y proporcionar potencia. En cambio, la periferia indica que no hay obstáculos que hagan sombra a un AG y la potencia teórica se convierte en la potencia ajustada. Las líneas de colores en la Fig. 8 corresponden a diferentes velocidades de viento. En este ejemplo se puede apreciar las mayores atenuaciones cuando el viento sopla hacia el norte o hacia el sur. Y las menores atenuaciones cuando sopla hacia el este o el oeste. Eso significa que la dirección predominante este/oeste requiere que los AG formen una línea mirando al este/oeste. Por supuesto, si esto es posible por las características del terreno.

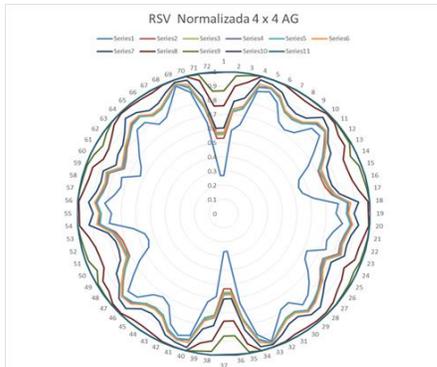


Fig. 8. Rosa de la sombra de los vientos para un AG en específico.

#### 4. Casos de estudio

Se presenta en esta sección los experimentos realizados a dos casos de estudio para la prueba del sistema de diagnóstico de parques eólicos. El primero es el Centro Experimental de Tecnología Eólica (CERTE) propiedad del INEEL. Sin embargo, este parque experimental cuenta con solo un AG de eje horizontal de la marca Komai de 300 KW (esto al momento de diseñar el sistema de diagnóstico). El segundo es el parque eólico de Villonaco en la República de Ecuador.

Para probar y validar el sistema de diagnóstico de parques, se diseñó un simulador de parques con capacidad de insertar los siguientes tipos de comportamiento:

- Comportamiento normal del parque según la velocidad y dirección del viento.
- Pérdida de potencia total en algún AG específico. El porcentaje de pérdida de potencia es programable.
- Potencia en cero y
- Desconexión eléctrica de un AG.

Las siguientes secciones muestran los casos de estudio.

##### A. CERTE 2x2

Se diseñó un parque hipotético CERTE con 4 AGs con las siguientes características:

- 1) Altura de los anemómetros: 40 mts
- 2) Eficiencia de cada aerogenerador: 100%
- 3) Modelo del aerogenerador: KWT32-300
- 4) Separación entre aerogeneradores: 85.5 mts
- 5) Radio de separación: 5.5 mts

La Tabla 1 muestra la distribución geográfica del parque y la Fig.9 muestra la localización física de los aerogeneradores en el parque.

TABLA 1. DISTRIBUCIONES DE LOS AG de CERTE

AG	X (mts)	Y (mts)	Latitud	Longitud
1	0	0	16°32'44.45"N	94°57'12.79"E
2	88.5	0	16°32'44.45"N	94°57'15.67"E
3	0	88.5	16°32'41.56"S	94°57'12.79"E
4	88.5	88.5	16°32'41.56"S	94°57'15.67"E

La curva de potencia del AG Komai se muestra en la Fig. 10. Nótese que se trata de un AG de 300 KW.



Fig. 9. Vista aérea del CERTE 2x2

##### B. Parque Villonaco

La central Eólica Villonaco se encuentra situada en el estado de Loja en la República del Ecuador. El parque consta de 11 AGs con los siguientes datos de configuración:

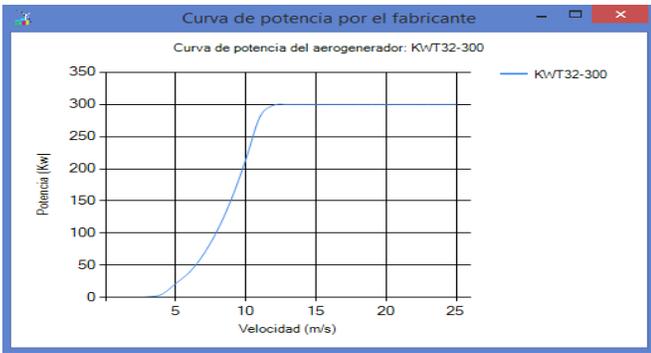


Fig. 10. Curva de potencia del AG marca Komai del CERTE



Fig. 12 Curva de potencia (GW70-1550) diseñada por el fabricante

- 1) Altura de los anemómetros: 60 mts
- 2) Eficiencia de cada aerogenerador: 100%
- 3) Modelo del aerogenerador: GW70-1550
- 4) Altura de rotor: 65 mts.
- 5) Potencia nominal de operación: 1,550 KW
- 6) Velocidad de arranque y nominal: 3, 15 m/seg.

La Tabla 2 muestra la distribución de los AGs asumiendo una coordenada de origen simulando la ubicación de los AGs instalados en la Central Eólica Villonaco, Loja, Ecuador tal y como se muestra en la fotografía de la Fig. 11.

TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DE LOS AGs

Aerogenerador	X(mts)	Y(mts)
1	0	1910
2	57	1730
3	161	1593
4	140	1393
5	268	1260
6	268	1054
7	356	870
8	422	687
9	422	484
10	449	239
11	487	0

La Fig. 12 muestra la curva de potencia para el cálculo de la potencia teórica en los AGs de Villonaco.



Fig. 11. Localización de los AGs en el parque de Villonaco

### C. Simulación del comportamiento normal

Esta sección muestra las interfaces del sistema **DxPQ** cuando se ejecuta con un simulador de parques en los casos del CERTE 2x2 y del parque Villonaco. El sistema funciona en línea en episodios de tiempo regulares configurados por el usuario. Puede ser de minutos o periodos más largos. El sistema lee las condiciones de velocidad y dirección del viento, calcula la potencia teórica en base a las curvas de potencia de los AGs, calcula la potencia ajustada si existen sombras y actualiza la potencia medida reportada por el SCADA del parque. La Fig. 13 muestra el despliegue de las condiciones de estos cálculos en el AG3 del CERTE.

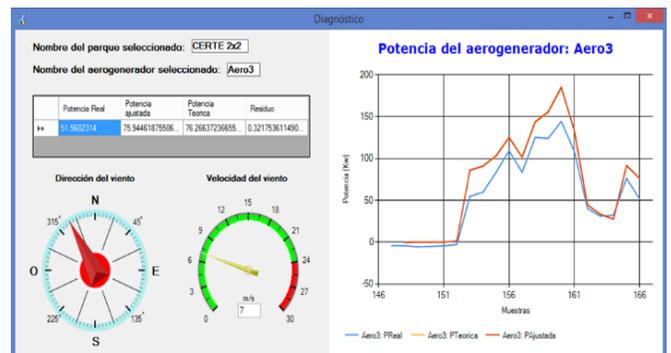


Fig. 13. Reporte de los cálculos del parque CERTE2x2

Se muestra la velocidad del viento en 7 m/seg, la dirección del viento al NNO lo que produce en el AG3 de CERTE una potencia teórica de 76.2, ajustada de 75.9 y real de 51 KW. A la derecha de la figura se muestra la gráfica en tiempo real de las tres potencias. El sistema considera funcionamiento correcto en base a los umbrales de diferencia entre los comportamientos. Puede verse en la gráfica de la derecha que existe un comportamiento “suficientemente” normal.

#### D. Simulación de falla de disminución de potencia

Se realizaron también simulaciones del parque Villonaco. Cabe hacer notar, que a diferencia del CERTE 2x2 que es un parque ficticio, el parque Villonaco es real y las configuraciones del parque se hicieron con datos reales. También los datos de entrada a la operación se utilizaron datos reales de ese lugar en Ecuador.

La Fig. 14 muestra el despliegue de las condiciones del AG1 de Villonaco. La velocidad del viento es de 5 m/seg, la dirección SO aproximadamente, la potencia teórica de 168.7, la ajustada del 173.6 y una potencia real de 119.6 KW.

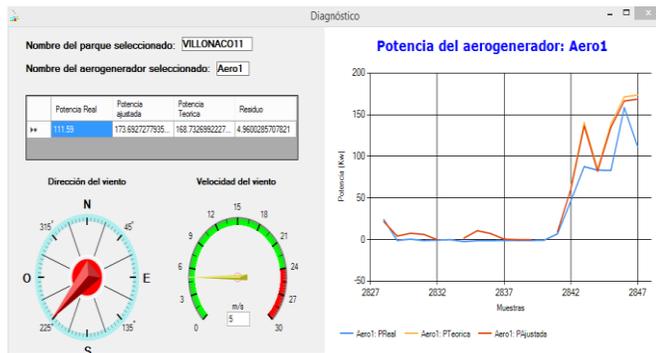


Fig. 14. Reporte de los cálculos del AG1 de Villonaco

La Fig. 15 muestra el despliegue del estado de los AGs del parque y la evidencia de que el AG1 presenta una condición anormal aunque no se declara en falla aún. Cuando el AG se presenta en color verde significa comportamiento correcto. Amarillo indica en condición de observación, en rojo condición de falla y en azul desconexión de la red. La cantidad reportada bajo cada AG representa la potencia generada por ese AG. Las diferencias en valores, dados las mismas condiciones de viento, se deben a las sombras de viento que algunos AG provocan en otros. Hay diferencias de valores pero no debido a fallas.

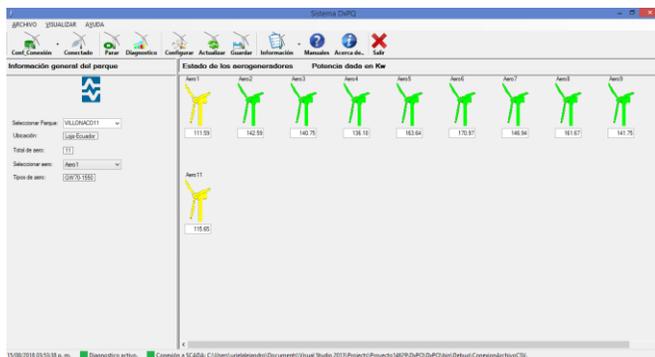


Fig. 15. Despliegue del diagnóstico en parque Villonaco

#### 5. Conclusiones y trabajo futuro

Se presenta en este artículo el desarrollo y prueba del sistema de diagnóstico inteligente de parques eólicos **DxPQ**. El sistema utiliza modelos de comportamiento del parque en estado normal y es capaz de detectar desviaciones a ese comportamiento normal. Los modelos de comportamiento están basados en tres tipos de potencias: teórica, ajustada y real. El sistema de diagnóstico presentado funciona para cualquier tipo de aerogenerador con cualquier tipo de generador eléctrico. Ya sea de inducción, doblemente alimentado o "full converter". La única restricción es la capacidad de generar modelo de comportamiento con datos históricos.

Como trabajo futuro, se continuará buscando un parque real donde haya la disposición de probar nuevas ideas de la utilización de técnicas de Inteligencia Artificial en el diagnóstico de parques.

#### 6. Referencias

- [1] Asociación Mexicana de Energía Eólica, (<http://www.amdee.org>) consultada en 2019.
- [2] Centro Mexicano de Innovación en Energía, CEMIE-Eólico, (<http://www.cemieeolico.org.mx>) consultada en 2019.
- [3] Joaquim Blesa, Pedro Jiménez, Damiano Rotondo, Fatiha Nejari, and Vicenç Puig, "An Interval NLPV Parity Equations Approach for Fault Detection and Isolation of a Wind Farm", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 6, June 2015.
- [4] Peter Fogh Odgaard and Jakob Stoustrup, "Fault Tolerant Wind Farm Control - a Benchmark Model", 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) Part of 2013 IEEE Multi-Conference on Systems and Control Hyderabad, India, August 28-30, 2013.
- [5] Pablo H. Ibarguengoytia, Uriel Garcia, Alberto Reyes, and Mónica Borunda, "Anomalies detection in the behavior of process using the sensor validation theory", Advances in Artificial Intelligence – IBERAMIA 2016, Lecture Notes in Computer Science. Volume 10022, Proceedings of the 15th Ibero-American Conference on AI, San José, Costa Rica, Noviembre 2016.
- [6] Uriel A. Garcia, Pablo H. Ibarguengoytia, Alberto Reyes, and Mónica Borunda, "Modelo de Comportamiento de una turbina eólica", Congreso Mexicano de Inteligencia Artificial COMIA 2016, Tonantzintla, Puebla, Mayo 2016.
- [7] Attias, Koby and Ladany, Shaul P., "Optimal Economic Layout of Turbines on Windfarms", Wind Engineering, Vol. 30, No. 2, 2006, pp 141-151.

#### 7. Biografías

**Pablo H. Ibarguengoytia.** Doctorado en Ciencias de la Computación por la Universidad de Salford, Inglaterra. Jubilado del INEEL después de 35 años y miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I

**Uriel A. García López.** Ingeniero en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Comitán, Chiapas, en proceso de titulación para el grado de Maestro en Optimización y Computo Aplicado por la UAEM.

**Alberto Reyes Ballesteros.** Doctorado en Ciencias de la Computación por el ITESM campus Cuernavaca. Realizó posdoct en el IST de la Universidad de Lisboa (2009). Es parte del claustro del centro de postgrado del INEEL y miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel I desde 2009.

# Acoplamiento de un sistema de enfriamiento y calentamiento

A. Acevedo<sup>1,a</sup>, J. A. Hernandez<sup>2,b</sup>, S. Silva<sup>2,c</sup>, D. Juárez<sup>2,d</sup>, A. Álvarez<sup>2,e</sup>, A. Huicochea<sup>2,f</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas CIICAp, UAEM

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Av. Universidad 1001, C. P. 62209 Cuernavaca Morelos, México

<sup>a</sup> abacqu@gmail.com, <sup>b</sup> alfredo@uaem.mx, <sup>c</sup> ssliva@uaem.mx, <sup>d</sup> djuarez7@gmail.com, <sup>e</sup> aalvarez@uaem.mx, <sup>f</sup> huico\_chea@uaem.mx

**Resumen**—Una alternativa para disminuir el uso de la energía primaria es el acoplamiento de sistemas energéticos. El calor residual de un sistema de compresión de doble etapa (TSCS) puede ser aprovechado por un Transformador de calor por absorción (AHT). El TSCS es operado con R410A, mientras que el AHT usa H<sub>2</sub>O/LiBr. A partir de la simulación el coeficiente del ciclo total (COP<sub>GRAL</sub>) más alto obtenido fue de 0.88, cuando la temperatura del condensador en el TSCC está a 336.15 K. La temperatura máxima de enfriamiento en el evaporador del TSCS es de 235.15 K, mientras que la temperatura máxima de descarga en el condensador en el TSCS es de 344.15 K. El máximo COP<sub>AHT</sub> obtenido es de 0.49 cuando el ascenso bruto de temperaturas (GTL<sub>AHT</sub>) disminuye hasta 12 K. El COP<sub>GRAL</sub> se incrementó hasta un 20% cuando el delta de temperaturas del condensador y evaporador del TSCS disminuye hasta 8 K. Así como, el rendimiento del TSCS se ve limitado hasta un 45%, ya que exige un esfuerzo mayor para poder retirar calor del condensador del TSCS a temperaturas mayores de 336.15 K.

*Palabras clave.* Transformador de calor por absorción; Recuperación de calor residual; Sistema de compresión de dos etapas; Proceso de integración de calor.

## 1. Introducción

### *Sistemas de refrigeración por compresión de doble etapa*

Los sistemas de compresión de doble etapa (TSCS) son muy utilizados en la industria para el mantenimiento de alimentos, frutas, verduras y algunos productos lácteos, así como farmacológicos [1]. En un TSCS circula un refrigerante a presión alta y baja para llevar a cabo el intercambio de calor, donde las condiciones de operación del componente a presión intermedia son determinantes [2], ya que pueden mejorar el rendimiento a bajas temperaturas [3], donde la disminución del trabajo de compresores mejora la eficiencia volumétrica [4] y el ajuste del desplazamiento de compresión de uno de los compresores disminuye considerablemente la temperatura de descarga en la sección de alta presión [5].

### *Transformador de calor por absorción*

Un Transformador de Calor por Absorción (AHT) es capaz de revalorizar una cantidad de energía residual y de fuentes renovables, para reutilizarlo en un proceso industrial adicional [6]. El AHT puede activarse a temperaturas de evaporación entre 30 y 80 °C, para obtener calor en el absorbedor entre 50 y 132 °C [7]. La fuente geotérmica o solar puede revalorizar el consumo de la energía de hasta un 50% [8]. Ventajas del AHT: bajas presiones de operación, consumo mínimo de energía de alta calidad, amigable con el medio ambiente con fluidos de

trabajo orgánicos o sales minerales [9]. Desventajas del AHT: Costo elevado de construcción, amplio espacio de operación, limitado por fluidos de trabajo [10]. Estudios recientes se han enfocado en la investigación de nuevos diseños o arreglos entre sus componentes, como la integración de intercambiadores de calor, para mejorar el coeficiente de operación, así mismo hay reportes donde se estudia las condiciones de operación específica para alcanzar altos niveles de temperatura en el absorbedor [11]. La aplicación de los AHT está limitada a ciertos procesos industriales, tales como la industria textil, desalinización de agua, y algunos procesos en la industria farmacéutica y petroquímica [12].

### *Acoplamientos de Sistemas de Compresión*

Diversos autores han propuesto configuraciones alternas sobre sistemas de compresión de una etapa (SSCS): adición de componentes, mejoras en los principales componentes y acoplamiento de ciclos, para incrementar el rendimiento de operación y el ahorro de energía [13]. Colorado y Rivera [14] realizaron un estudio teórico para comparar un sistema SSCS/AHP de una etapa y un SSCS/AHP de doble etapa, usando CO<sub>2</sub> y R134a para el SSCS y H<sub>2</sub>O/LiBr para AHP. Los consumos energéticos disminuyeron hasta un 45% y el COP de 0.58 a 0.9 con el uso de la combinación del R134a - H<sub>2</sub>O/LiBr. Jensen et al. [15] integraron un sistema híbrido de un SSCS/AHP con compresor, para incrementar en nivel térmico del condensador en el AHP. Usando el compresor, el COP de todo sistema disminuye considerablemente hasta un 50%, pero la temperatura del condensador aumenta hasta 130 °C a presiones bajas (28 bar) y de 147 a 250 °C a presiones altas (140 bar). Liu et al. [16] estudiaron un SSCS integrado con una AHP, para el sistema de compresión utilizaron el refrigerante R134a y para el sistema de absorción utilizaron NH<sub>3</sub>/LiNO<sub>3</sub>. La potencia del compresor aumenta cuando la carga de calor en el evaporador y la descarga de calor en el condensador disminuyen. También concluyen que la velocidad del compresor es un factor importante para determinar la cantidad de calor de descarga en el absorbedor y condensador en el sistema de absorción. Farshi et al. [17], realizaron un estudio en un ciclo de compresión de cascada (CC) integrado a un AHP con NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>O/NH<sub>3</sub> respectivamente. Se determinó que el absorbedor y el desorbedor son los componentes donde mayor pérdida de exergía existe, también se demostró que el rendimiento aumenta si la relación de compresión es baja.

Basado en la revisión bibliográfica, los sistemas de compresión de simple etapa y las bombas de calor por absorción son los más estudiados. Para el caso del acoplamiento del TSCS-AHT, no existe estudio teórico y experimental en la literatura que demuestre los beneficios del acoplamiento. Por lo tanto, se estudia teóricamente el acoplamiento del TSCS con R410A y el AHT usando LiBr-H<sub>2</sub>O. El objetivo principal es recuperar el calor del sumidero del TSCS para ser aprovechado en el evaporador del AHT, y así disminuir su carga inicial de activación. Se presentan un análisis de energía en forma integral, donde se varía la temperatura de acoplamiento del condensador y evaporador del TSCS y AHT respectivamente, manteniendo la temperatura de enfriamiento a 235.15 K.

### Descripción del TSCS

El refrigerante R-410A sale del compresor de baja presión como vapor sobrecalentado a presión y temperatura para entrar al flash-intercooler (2), el refrigerante se enfría en el flash-intercooler por medio de evaporación del líquido que proviene del proceso de estrangulación de la válvula de alta presión (6). El refrigerante intercambia calor y sale como líquido saturado (7), posteriormente se expande en la válvula de baja presión para ingresar a temperatura y presión baja a la entrada del evaporador (8), entonces, el refrigerante recibe calor del espacio a refrigerar ( $\dot{Q}_{EV}$ ). El intercambio de calor que ocurre en el flash-intercooler, entre la mezcla del vapor que proviene del compresor de baja presión y el refrigerante de la válvula de alta presión ingresa como líquido refrigerante al compresor de alta presión (3), donde se comprime para ser enviado a la temperatura y presión de entrada del condensador (4). El calor del refrigerante es cedido por el condensador ( $\dot{Q}_{CO}$ ), y sale como líquido para ser estrangulado a una presión intermedia (5), donde se enfría en el flash-intercooler para realiza un intercambio de calor y repetir el ciclo, como se muestra en la Fig. 1.

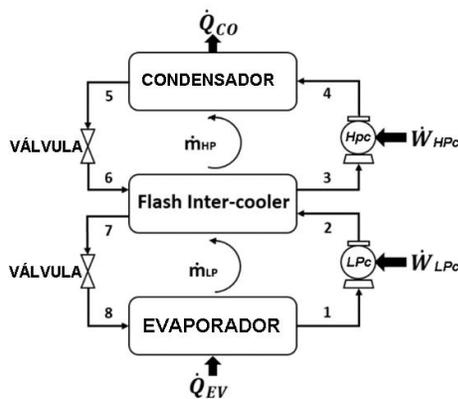


Fig. 1. Diagrama esquemático del TSCS.

### Descripción del AHT

El ciclo termodinámico en el AHT mostrado en la Fig. 2, comienza cuando se suministra calor a una temperatura media en el generador y evaporador ( $T_{GE}, T_{EV}$ ). En el generador se separa parcialmente el refrigerante de la mezcla que proviene del absorbedor, obteniendo así una solución concentrada de H<sub>2</sub>O/LiBr y vapor. El refrigerante ingresa al condensador para cambiar de fase a líquido saturado y ser bombeado al evaporador a un nivel de presión mayor. En el evaporador, el refrigerante cambia a fase vapor, el cual alimenta al absorbedor para hacer contacto con la solución concentrada de H<sub>2</sub>O/LiBr que proviene del generador, de esta manera se produce una reacción exotérmica generando calor a una temperatura mucho mayor que la del evaporador.

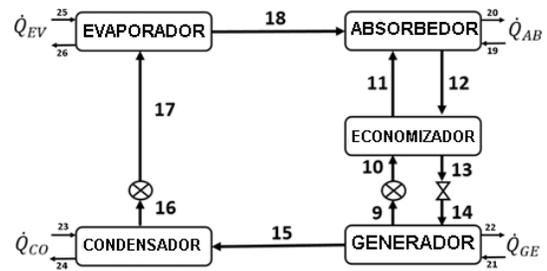


Fig. 2. Diagrama esquemático del AHT.

### Acoplamiento del TSCS-AHT

Una alternativa para recuperar o disminuir la energía de desecho es el acoplamiento dado entre sistemas energéticos, ya que el calor residual del primero contribuye para la activación en forma parcial o total del segundo. Para el caso de estudio, el calor residual del condensador dado por un TSCS, puede ser usado para activar el evaporador de un AHT para disminuir su requerimiento de calor, como se especifica en la Fig. 3.

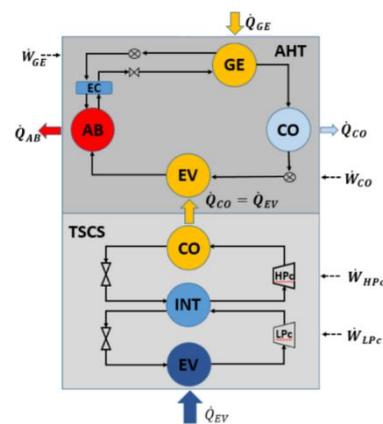


Fig. 3. Diagrama esquemático del acoplamiento del TSCS-AHT.

## 2. Análisis termodinámico

Para el análisis del sistema integral del TSCS-AHT se aplican los principios de conservación de la materia y energía, a través de la primera ley de la termodinámica bajo las siguientes suposiciones:

a) Todos los componentes se encuentran en condiciones de estado estable b) Se desprecian las pérdidas de energía potencial y energía cinética, c) No hay pérdidas de calor y pérdidas de presión en el sistema, d) El paso del líquido por las válvulas es isoentálpico, e) La solución de H<sub>2</sub>O/LiBr está en saturación a la salida del generador y absorbedor, f) El fluido de trabajo tiene condiciones de saturación a la salida del condensador y evaporador, g) el vapor es sobrecalentado a la salida del generador y, para el sistema de TSCS, h) Los compresores adiabáticos de baja y alta presión trabajan a una eficiencia del 85 %, i) La temperatura de refrigeración es 235.15 K.

Conservación de masa:

$$\sum \dot{m}_{IN} - \sum \dot{m}_{OUT} = 0 \quad (1)$$

Balance de masa por especie:

$$\sum \dot{m}_{IN} X_{IN} - \sum \dot{m}_{OUT} X_{OUT} = 0 \quad (2)$$

Conservación de la energía:

$$(\sum \dot{m}_{IN} h_{IN} - \sum \dot{m}_{OUT} h_{OUT}) + (\sum \dot{Q}_{IN} - \sum \dot{Q}_{OUT}) + \dot{W} = 0 \quad (3)$$

Los balances de energía para el acoplamiento de los sistemas de enfriamiento y calentamiento se indican en la Tabla 1 y 2.

TABLA 1. BALANCES DE ENERGÍA DEL AHT

Componente	Balance de Energía
Absorbedor	$\dot{m}_{18} + \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$ $\dot{Q}_{AB} = \dot{m}_{18}(h_{18}) + \dot{m}_{11}(h_{11}) - \dot{m}_{12}(h_{12})$
Generador	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_9 + \dot{m}_{15}$ $\dot{Q}_{GE} = \dot{m}_{14}(h_{14}) - \dot{m}_9(h_9) - \dot{m}_{15}(h_{15})$
Evaporador	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18}$ $\dot{Q}_{EV} = \dot{m}_{17}(h_{17} - h_{18})$
Bomba del condensador	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$ $\dot{W}_{CO} = \dot{m}_{16}(P_{AB} - P_{GE})f$
Bomba del generador	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$ $\dot{W}_{GE} = \dot{m}_9(P_{AB} - P_{GE})f$
COP <sub>AHT</sub>	$COP_{AHT} = \frac{\dot{Q}_{AB}}{\dot{W}_{CO} + \dot{W}_{GE} + \dot{Q}_{GE} + \dot{Q}_{EV}}$

TABLA 2. BALANCES DE ENERGÍA DEL TSCS

Componente	Balance de Energía
Evaporador	$\dot{Q}_{EV} = \dot{m}_{1p}(h_1 - h_8)$
Compresor de baja presión	$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_{LPC}(h_2 - h_1)$
Compresor de alta presión	$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_{HPC}(h_4 - h_3)$
COP <sub>TSCS</sub>	$COP_{TSCS} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_{LPC} + \dot{W}_{HPC}}$

### A. Criterio de desempeño integral

Para obtener un análisis general del acoplamiento entre el TSCS y el AHT, se propone el desempeño de operación general (COP<sub>GRAL</sub>) del sistema TSCS/AHT donde se define en función de la transferencia de energía en el volumen de control, el cual es representado en la Fig. 3. El COP<sub>GRAL</sub> relaciona los calores disponibles a temperatura alta y baja con respecto a la energía suministrada en el sistema:

$$COP_{GRAL} = \frac{\dot{Q}_{AB,AHT} + \dot{Q}_{EV,TSCS}}{\dot{W}_{CO} + \dot{W}_{GE} + \dot{W}_{LPC} + \dot{W}_{HPC} + \dot{Q}_{GE}} \quad (4)$$

Donde,  $\dot{Q}_{AB,AHT}$  es el calor útil revalorizado a alta temperatura en el absorbedor del AHT,  $\dot{Q}_{EV,TSCS}$  es el calor que retira el evaporador a nivel térmico bajo en el TSCS,  $\dot{W}_{CO} + \dot{W}_{GE}$  es la potencia suministrado por las bombas en el AHT,  $\dot{Q}_{GE}$  es el flujo de calor suministrado en el AHT y  $\dot{W}_{LPC} + \dot{W}_{HPC}$  es el trabajo total de los compresores suministrado en el TSCS.

### B. Resultados y Discusión

Las propiedades termodinámicas del refrigerante R410A usado en el TSCS son obtenidas del REFPRO 10.0 del NIST [18] y, para las propiedades termodinámicas del H<sub>2</sub>O/LiBr se obtuvieron mediante correlaciones experimentales reportadas por G.A. Florides et al. [19]. Los balances de energía son desarrollados mediante un simulador termodinámico en el lenguaje de programación Matlab. Los resultados son validados del TSCS con un trabajo previamente reportado por Nikolaidis and Probert [20], mientras los resultados del AHT son comparados con Eisa et al. [21].

TABLA 3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS DEL TSCS Y TCA

TSCS				AHT						
Variables	Nikolaidis and Probert (1998)	Actual	Error (%)	T <sub>GE</sub> (K)	T <sub>EV</sub> (K)	T <sub>CO</sub> (K)	T <sub>AB</sub> (K)	COP(dim)	Eisa et al. (1986)	Error (%)
Q <sub>CO</sub> (kW)	140.5	140.53	0.02	333.15	333.15	293.15	373.15	0.287	0.294	-2.38
W <sub>HP</sub> (kW)	33.04	33.05	0.03	343.15	343.15	293.15	373.15	0.477	0.477	0
W <sub>LP</sub> (kW)	23.23	23.79	2.41	343.15	343.15	303.15	373.15	0.456	0.456	0
COP (dim)	1.78	1.77	-0.56	343.15	343.15	313.15	373.15	0.248	0.255	-2.74
				353.15	353.15	303.15	373.15	0.485	0.486	-0.20

Las diferencias encontradas entre los datos reportados y este trabajo presentan valores similares con un máximo error relativo de hasta 2.41 % para el TSCS y -2.74 % para el AHT.

La Fig. 4 muestra las variaciones del  $COP_{TSCS}$  a diferentes  $T_{CO,TSCS}$  y  $T_{INT,TSCS}$  a una  $T_{EV,TSCS}$  constante de 235.15 K. Es claro que los  $COP_{TSCS}$  disminuyen conforme se incrementa a temperatura del condensador en el TSCS, debido a que el compresor de alta presión requiere mayor cantidad de trabajo para alcanzar temperaturas más altas para el requerimiento del  $T_{EV,AHT}$ , el cual debe ser como mínimo 340 K para evaporar el refrigerante a una presión de 4.47 kPa. También, se aprecia que las  $T_{INT,TSCS}$  del intercambio de calor entre el circuito de alta y baja presión es trascendente, ya que a mayor  $T_{INT,TSCS}$  la relación de la presión alta a la baja disminuye, por lo cual los rendimientos de energía mejoran. El TSCS es capaz de proporcionar el  $Q_{EV,AHT}$  a  $T_{EV,AHT}$  mayores de 340 K, sacrificando sus rendimientos de energía, sin embargo se pueden mejorar si el intercambio de calor en el intercooler flash trabaja a altas temperaturas para que el refrigerante que circula a alta presión se incremente.

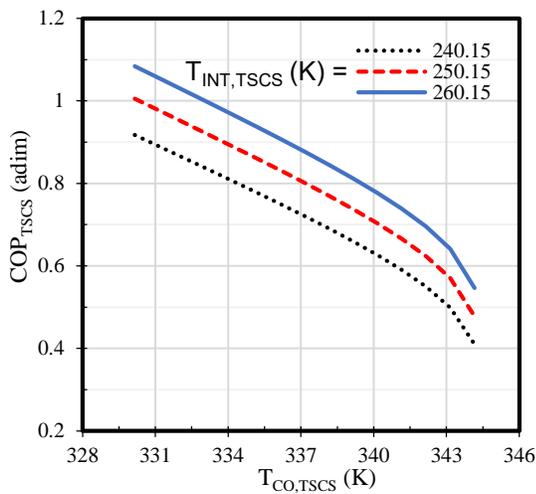


Fig. 4. Desempeño de energía del TSCS

La Fig. 5 presenta los  $COP_{AHT}$  a diferentes GTL y  $T_{CO,AHT}$  con  $T_{EV,TSCS}$  y  $T_{EV,AHT}$  constantes. Como ya ha sido reportado en trabajos previos, el  $COP_{AHT}$  disminuye, si el GTL se incrementa debido a que su comportamiento es inversamente proporcional dado por el balance de masa y energía del ciclo termodinámico [41]. Es claro que el desempeño del AHT depende directamente de sus temperaturas de activación y sumidero. Si la fuente de activación del evaporador dado por el TSCS es constante, el comportamiento del GTL y el  $COP_{AHT}$  dependen de la  $T_{CO,AHT}$ , la cual puede favorecer para tener una concentración diluida y una temperatura alta en el absorbedor, lo que se convierte en tener un mejor GTL y menor  $COP_{AHT}$ . En caso contrario, puede favorecer para tener una solución concentrada y tener un mejor  $COP_{AHT}$  y un GTL limitado.

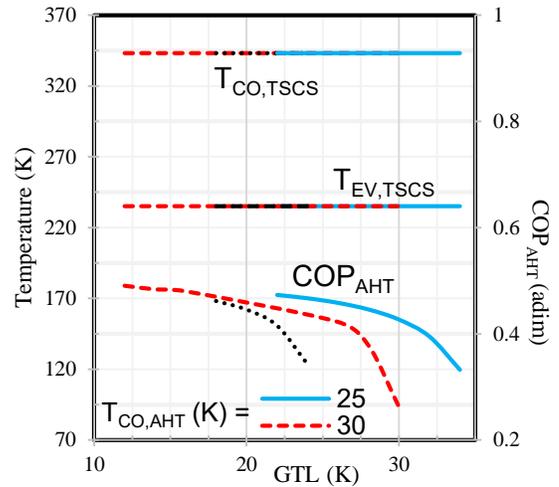


Fig. 5. Comportamiento del  $COP_{AHT}$  a diferentes GTL a  $T_{EV,TSCS}$  y  $T_{CO,TSCS}$  constantes

La Fig. 6 muestra el efecto de la temperatura de  $T_{GE,AHT} = T_{EV,AHT}$  en los  $COP_{TSCS}$  y  $COP_{AHT}$ . Es evidente que el  $COP_{TSCS}$  disminuye conforme la temperatura de  $T_{GE,AHT} = T_{EV,AHT}$  aumenta, debido a que la energía requerida en el condensador del TSCS es mayor para activar el evaporador del AHT (descripción de Fig. 4). El  $COP_{AHT}$  incrementa conforme la temperatura  $T_{GE,AHT} = T_{EV,AHT}$  aumenta, lo que aumenta el calor suministrado, sin embargo, el calor revalorizado en el absorbedor es mayor, lo que hace que el  $COP_{AHT}$  sea mayor. El  $COP_{TSCS}$  siempre disminuye, mientras el  $COP_{AHT}$  se incrementa, lo que conlleva a realizar una evaluación integral, a fin de determinar la conveniencia del acoplamiento.

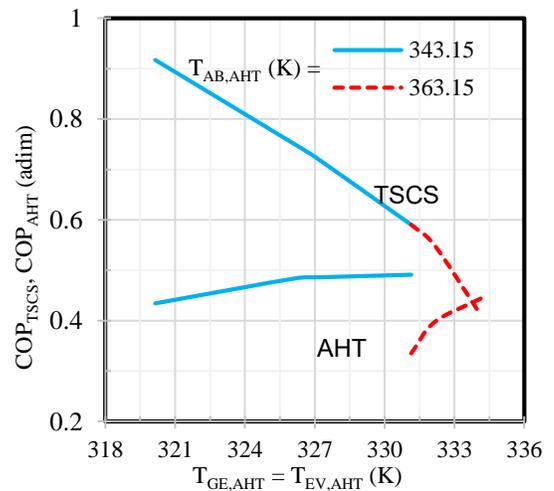


Fig. 6. Desempeño del COP en cada sistema térmico a diferentes  $T_{GE,AHT} = T_{EV,AHT}$

La evaluación térmica del acoplamiento TSCS/AHT es llevada a cabo mediante el  $COP_{GRAL}$  como se indica en la Fig. 7. Para el caso particular del análisis: el objetivo del sistema de enfriamiento es retirar el mayor calor a una temperatura baja (235.15 K) de un espacio y el sistema de calentamiento tiene como finalidad revalorizar el mayor calor residual a un nivel térmico alto. Por lo anterior, el sistema TSCS/AHT se analiza considerando el calor y temperatura obtenidos en el volumen de control de la Figura 3 a través del  $COP_{GRAL}$ , considerando dos condiciones de temperatura de condensación del TSCS (336.15 y 344.15 K) y una temperatura de condensación del AHT (298.15 K). Es claro, que la  $T_{CO,TSCS}$  juega un rol importante, debido a que existe un nivel térmico de intercambio de calor entre ambos sistemas. Cuando  $T_{CO,TSCS}$  es bajo se alcanza un  $COP_{GRAL}$  más alto. Si el  $T_{CO,TSCS}$  es de 336.15 K, el  $COP_{TSCS}$  puede alcanzar valores bajos de 0.749, el cual es menor comparado con el mismo sistema sin acoplamiento [22], sin embargo es necesario para alcanzar la temperatura de saturación del refrigerante del AHT, donde su desempeño varía entre 0.484 y 0.344. En otras palabras, el sistema de enfriamiento retira menos calor, que el calor revalorizado por el AHT con temperaturas atractivas para ambos sistemas.

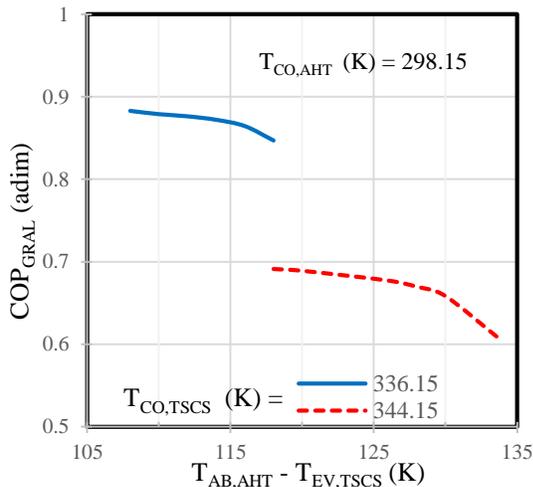


Fig. 7. Comparación de  $COP_{GRAL}$  versus  $T_{AB,AHT} - T_{EV,TSCS}$

### C. Conclusiones

Se ha demostrado teóricamente que es posible llevar a cabo un acoplamiento de un sistema de enfriamiento (TSCS) y uno de calentamiento (AHT) para recuperar el calor del primero y reutilizar en el último. El análisis se llevó a cabo para cuantificar la cantidad de energía a través de la primera ley de la termodinámica. El calor de condensación del R410A en el TSCS es usado para la evaporación del agua en el AHT, quien trabaja con la solución de  $H_2O/LiBr$ . Los resultados del simulador termodinámico se validaron en forma individual con un error máximo de -2.74 % con respecto a datos publicados

en literatura. Los resultados demuestran que el TSCS puede alcanzar temperaturas de condensación desde 330.15 a 344.15 K, los cuales son adecuados para evaporar el refrigerante del AHT, sin embargo, su rendimiento de energía disminuye, siendo menores a aquellos obtenidos sin acoplamiento. Por otro lado, se puede observar que el comportamiento del  $COP_{GRAL}$  está en función del  $T_{CO,TSCS}$  y el  $Q_{CO,TSCS}$ , pues son variables en donde ocurre el intercambio de calor entre ambos sistemas energéticos. El  $COP_{GRAL}$  alcanza valores entre 0.840 y 0.870 cuando la diferencia de temperaturas  $T_{AB,AHT} - T_{EV,TSCS}$  decrece de 390.15 a 380.15 K.

### 3. Conclusiones

Se ha demostrado teóricamente que es posible llevar a cabo un acoplamiento de un sistema de enfriamiento (TSCS) y uno de calentamiento (AHT) para recuperar el calor del primero y reutilizar en el último. El análisis se llevó a cabo para cuantificar la cantidad de energía a través de la primera ley de la termodinámica. El calor de condensación del R410A en el TSCS es usado para la evaporación del agua en el AHT, quien trabaja con la solución de  $H_2O/LiBr$ . Los resultados del simulador termodinámico se validaron en forma individual con un error máximo de -2.74 % con respecto a datos publicados en literatura. Los resultados demuestran que el TSCS puede alcanzar temperaturas de condensación desde 330.15 a 344.15 K, los cuales son adecuados para evaporar el refrigerante del AHT, sin embargo, su rendimiento de energía disminuye, siendo menores a aquellos obtenidos sin acoplamiento. Por otro lado, se puede observar que el comportamiento del  $COP_{GRAL}$  está en función del  $T_{CO,TSCS}$  y el  $Q_{CO,TSCS}$ , pues son variables en donde ocurre el intercambio de calor entre ambos sistemas energéticos. El  $COP_{GRAL}$  alcanza valores entre 0.840 y 0.870 cuando la diferencia de temperaturas  $T_{AB,AHT} - T_{EV,TSCS}$  decrece de 390.15 a 380.15 K..

### 4. Referencias

- [1] I. Dincer, Renewable energy and sustainable development: a crucial review, *Renew Sust Energ Rev.* 4 (2000)157-175.
- [2] D.H. Kim, M.S. Kim, The effect of water temperature lift on the performance of cascade heat pump system, *Appl Therm Eng.* 67 (2014) 273–82.
- [3] M. Aminyavari, B. Najafi, A. Shirazi, F. Rinaldi, Exergetic, economic and environmental (3E) analyses and multi-objective optimization of a  $CO_2/NH_3$  cascade refrigeration system, *Appl Therm Eng.* 65 (2014) 42–50.
- [4] S.X. Xu, G.Y. Ma, Experimental study on two-stage compression refrigeration/heat pump system with dual-cylinder rolling piston compressor, *Appl Therm Eng.* 62 (2014) 803–8.
- [5] X. Han, W. Fan, M. Qu, J.B. Chen, Q.H. Chen, Frosting characteristics of fin-tube heat exchanger at temperature range of  $-18$  to  $6$  °C of a cascade heat pump, *Appl Therm Eng.* 67 (2014) 131–6..
- [6] G. Oluleye, M. Jobson, R. Smith, Process integration of waste heat upgrading technologies, *Process Saf Environ.* (2016)
- [7] S.J Hong, C.H. Lee, S.M. Kim, I.G. Kim, O.K. Kwon, C.W. Park, Analysis of single stage steam generating absorption heat transformer. *Appl Therm Eng.* 144 (2018) 1109-1116.
- [8] O. Bamigbetan, T.M. Eikevik, P. Neksa, M. Bantle, Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural

- working fluids, *Int J Refrig.* 80 (2017) 197–211. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.04.021>
- [9] Z.W. Ma, H.S. Bao, A.P. Roskilly, Performance analysis of ultralow grade waste heat upgrade using absorption heat transformer, *Appl Therm Eng.* 101 (2016) 350-61.
- [10] P.J. Solorzano, L.I. Morales, N. Demesa. Design and characterization of an evaporator condenser duplex equipment for an absorption machine. *Revista multidisciplinaria de avances de investigacion.* ISSN (2018) 2448-5772 (3).
- [11] N. Demesa, J.A. Hernández, J. Siqueiros, A. Huicochea, Heat transfer coefficients for helical components inside an absorption heat transformer, *Int J Heat Mass Transfer.* 120 (2017) 342-349. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.038
- [12] P. Donnellan, K. Cronin, Y. Acevedo, E. Byrne. Economic evaluation of an industrial high temperature lift heat transformer, *Energy.* 73 (2014) 581-91. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.059>.
- [13] C. Schweigler, M. Helm, T. Eckert, Flexible Heat Pump or Chiller with Hybrid Water/LiBr Absorption/Compression Cycle, *Int J Refrig.* (2018) S0140-7007(18)30080-X.
- [14] D. Colorado, W. Rivera, Performance comparison between a conventional vapor compression and compression-absorption single-stage and double-stage systems used for refrigeration, *Appl Therm Eng.* (2015) S1359-4311(15)00474-3.
- [15] J.K. Jensen, W.B. Markussen, L. Reinholdt, B. Elmegaard, On the development of high temperature ammonia-water hybrid absorption-compression heat pumps, *Int J Refrig.* (2015) S0140-7007(15)00173-5.
- [16] C. Liu, Y. Jiang, W. Han, Q. Kang. A high-temperature hybrid absorption-compression heat pump for waste heat recovery. (2018). *Energy Conversion and Management* 172. 391–401. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.07.027>
- [17] L. G. Farshi, S. Khalili, A.H. Mosaffa. Thermodynamic analysis of a cascaded compression- absorption heat pump and comparison with three classes of conventional heat pumps for the waste heat recovery, (2017) *Appl Therm Eng* S1359-4311(17)31593-4.
- [18] REFPRO Reference Fluids Thermodynamics and Transport Properties 2018. NIST Standar Reference Database 23.
- [19] G.A. Florides, S.A. Kalogirou, S.A. Tassou, L.C. Wrobel, Design and construction of a LiBr–water absorption machine, *Ener Convers Manage.* (2002) 2483–2508. DOI: 10.1016/S0196-8904(03)00006-2
- [20] C. Nikolaidis, D. Probert, Exergy-method analysis of a two-stage vapour-compression refrigeration-plants performance, *Appl Energ.* 60 (1998) 241-256. PII. S0306-2619(98)00030-0
- [21] M.A.R. Eisa, R. Best, F.A. Holland, Thermodynamic design data for absorption heat transformers Part I. operating on water – lithium bromide, *Heat Recov Syst.* 6 (1986) 421-432.
- [22] N. Demesa, J.A. Hernández, J. Siqueiros, A. Huicochea, Heat transfer coefficients for helical components inside an Absorption Heat Transformer, *Int J Heat Mass Tran.* 120 (2018) 342-349.

## 5. Biografías

Abisai Acevedo obtuvo su grado de I.Q. en el Instituto Tecnológico de Zacatepec en 2008 y posgrado de M.I.C.A en el CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos. Actualmente realiza el doctorado en el área de térmica aplicada y está haciendo investigación en transformadores de calor y sistemas de refrigeración.

José Alfredo Hernández obtuvo su grado de I.Q. en la Universidad Veracruzana, la M.C por el instituto tecnológico de Veracruz, el grado de PhD en Ingeniería de Procesos, ENSIA, France, donde, obtuvo Mención honorífica más alta que otorga el gobierno francés por la obtención del grado de Doctor (Mention très honorable avec les félicitations du jury). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores SIN III, Evaluador Internacional de proyectos de Natural Sciences and Engineering Research Concl of CANADA. Revisor de diferentes artículos de diferentes prestigiadas revistas internacionales con reconocimiento internacionales (con diferentes factores de impacto). Actualmente trabaja como profesor investigador de tiempo completo en el

CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos, donde, se especializa en Modelación y Simulación de Procesos en Ingeniería.

Susana Silva obtuvo su grado de I.Q. en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, la M.C por la UNAM y el PhD en University of Southampton, Southampton, England. Actualmente trabaja como profesor investigador de tiempo completo en el CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos, donde, se especializa en el diseño de reactores electroquímicos y entre sus trabajos de investigación destaca la ingeniería de procesos químicos, mecánicos, ambientales; así, como el modelado de procesos térmicos.

David Juárez obtuvo su grado de I.Q. en la UNAM, la M.I.Q. y el PhD en Colegio Imperial de Londres, Reino Unido. Actualmente trabaja como profesor investigador de tiempo completo en el CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos, donde, se especializa en Desarrollar Modelos que utilizan principios fenomenológicos, matemáticos y computacionales.

Alberto Álvarez obtuvo su grado de I.Q. en la Universidad de Michoacán, la M.C y el PhD en University of Southampton, Southampton, England. Actualmente trabaja como profesor investigador de tiempo completo en el CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos, donde, se especializa en Ingeniería aplicada en procesos químicos, mecánicos y ambientales.

Armando Huicochea obtuvo su grado de I.E.M. en el Instituto Tecnológico de Zacatepec, el grado de M.I.C.A y Dr. en el CIICAP por la UAEM, en el estado de Morelos. Actualmente trabaja como profesor investigador de tiempo completo en el CIICAP por la UAEM, donde, se especializa en Ingeniería de Térmica Aplicada, entre sus trabajos de investigación destaca los procesos térmicos, transferencia de calor y transformadores térmicos por absorción.

# Implementación de señales de conmutación tipo SPWM en FPGA para inversores multinivel

B. Chavarría<sup>1,a</sup>, J. Aguayo<sup>1,b</sup>, S. de León<sup>2,c</sup>, J. Chacha<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Depto. de Ingeniería Electrónica

<sup>2</sup> Universidad Internacional Iberoamericana, Depto. de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> benjamin.chavarría18ea@cenidet.edu.mx, <sup>b</sup> jaguayo@cenidet.edu.mx, <sup>c</sup> susana.deleon@unini.edu.mx, <sup>d</sup> ii.javierchacha@gmail.com

**Resumen**—Los convertidores de potencia actuales emplean dispositivos semiconductores para controlar parámetros como corriente, voltaje y potencia. Estos dispositivos semiconductores requieren de una etapa de pulsos de comando generalmente basada en sistemas digitales. Este trabajo muestra un procedimiento para programar desde un entorno gráfico los pulsos de comando para un inversor multinivel en un FPGA, este método resulta más fácil de aprender y utilizar que un entorno tradicional de código escrito. Los pulsos de comando implementados en el FPGA son visualizados en un osciloscopio.

**Palabras clave.** Dispositivos FPGA, Programación VHDL, Modulaciones SPWM, Inversores multinivel.

## 1. Introducción

Los inversores multinivel son una topología de dispositivos semiconductores propios de la electrónica de potencia, se trata de dispositivos que son capaces de convertir una corriente directa (como la corriente de un banco de baterías) en una corriente alterna con un índice de THD (Total Harmonic Distortion por sus siglas en inglés) menor que un inversor de corriente tradicional [1]. En la Fig. 1 se muestran los pulsos de comando tipo SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation por sus siglas en inglés) de un inversor tradicional de 2 niveles, un inversor de 3 niveles y un inversor de 7 niveles. Resulta importante mencionar que el término multinivel se aplica para todo inversor de 3 niveles o superior.

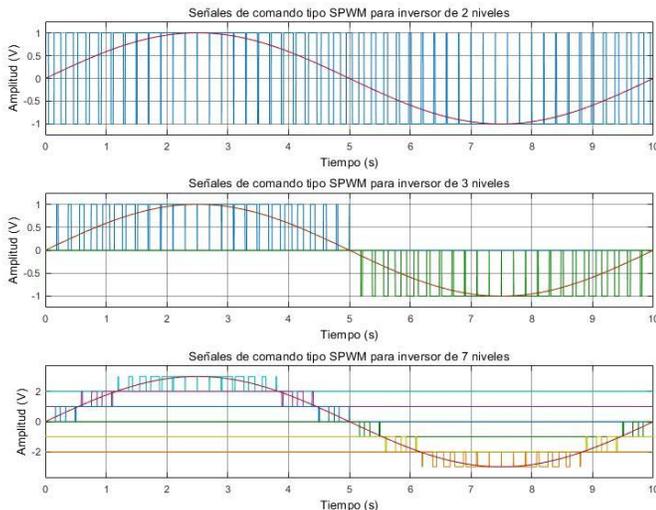


Fig 1. Diferentes pulsos de comando tipo SPWM para inversores.

Un inversor multinivel distribuye el proceso de conversión de CD (Corriente Directa) a CA (Corriente Alterna) en varias secciones de trabajo paralelo para emplear dispositivos semiconductores de menor potencia, a diferencia de un inversor tradicional donde toda la corriente es soportada por un solo arreglo de dispositivos semiconductores, esta forma de operación por secciones o “modular” permite a los inversores multinivel operar en rangos de baja o mediana tensión [1], [2].

Los inversores multinivel resultan convenientes para ser utilizados en sistemas de generación de energía basados en fuentes renovables porque muchos de estos sistemas entregan un bus de CD que debe ser procesado y convertido en una señal de corriente alterna de baja distorsión armónica, especialmente si este sistema tiene la función de aportar energía a la red eléctrica. Cabe destacar que muchos de estos sistemas generan aportaciones de baja tensión a la red principal porque se trata de sistemas de uso doméstico o aplicaciones que involucren el uso de microredes [3].

En 1981 se introdujo el término inversor multinivel por los investigadores A. Nabae, I. Takahashi y H. Akagi [3], [4]. Desde entonces se han propuesto topologías de inversores multinivel basadas en diversos dispositivos semiconductores y técnicas de modulación [2]. Este trabajo emplea la técnica de modulación SPWM para un inversor de 5 niveles CHB (Cascaded H-Bridge por sus siglas en inglés) [1], [5].

Como se detalla en [1] y [5] un inversor multinivel CHB está constituido por un arreglo de interruptores (dispositivos semiconductores) que constituyen una celda que se conecta en cascada con otras celdas para generar los niveles del inversor. Las celdas son las encargadas de procesar la corriente del bus de CD y convertirla en CA, para realizar esta función se emplea una técnica de modulación (encargada de dar la forma senoidal a la corriente de salida), mediante los pulsos de comando generados por la modulación se rige la conmutación de las celdas de los puentes H, en este caso una modulación SPWM.

Las modulaciones SPWM permiten obtener pulsos de comando en frecuencias que oscilan el orden de los Kiloherzt. Las frecuencias de conmutación elevadas permiten sintetizar una forma de onda más cercana a la senoidal reduciendo el contenido armónico, sin embargo, se requiere de mucha precisión para generar estos pulsos de comando.

Para obtener los pulsos de comando mediante la modulación SPWM es necesario contar con la señal senoidal moduladora (60 Hz para redes eléctricas americanas) que será comparada con las señales triangulares portadoras (en frecuencias del orden de los Kiloherztz), este procesamiento de señales comúnmente se lleva a cabo en un dispositivo portátil capaz de ser montado cerca de los puentes H (dispositivos de potencia), de fácil reprogramación y de bajo costo. Por ese motivo quedan descartadas opciones como los generadores de funciones o el uso de circuitería analógica a base de amplificadores operacionales. Siendo la mejor opción el uso de sistemas embebidos digitales.

Sin embargo, los sistemas embebidos digitales basados en microprocesadores o microcontroladores conllevan a un conjunto de restricciones, debido a su forma de operación cíclica en ejecución de código y su compleja asignación de prioridades en rutinas [6], [7]. En estos dispositivos es común la aparición de retardos, tiempos muertos o desfase de señales al ejecutar código e instrucciones en altas frecuencias, una tarea necesaria en la implementación de pulsos de comando SPWM.

Una alternativa muy rentable es el uso de dispositivos basados en la descripción de Hardware, específicamente las FPGA (Field-programmable gate array por sus siglas en inglés) que permiten la implementación de pulsos de comando libres de distorsiones, retardos de tiempo o desfases, como se presenta en los trabajos [8] y [9].

En la literatura se encuentran trabajos que muestran el uso de las FPGAs en la implementación de pulsos de comando para inversores, como se expone en [8], [9] y [10]. Se observó la necesidad de emplear el lenguaje de programación VHDL (acrónimo proveniente de VHSIC <<Very High Speed Integrated Circuit>> y HDL <<Hardware Description Language>>), este lenguaje permite la descripción de hardware dentro del FPGA. Sin embargo, para su uso se requiere superar una curva de aprendizaje que implica el conocimiento de los paradigmas de programación propios de la estructura del lenguaje VHDL y el entendimiento de la tarjeta de desarrollo donde se encuentre montada el FPGA.

En este trabajo se propone una forma de programar una FPGA de la familia Spartan 6 recurriendo al uso de bloques dedicados dentro del entorno Matlab/Simulink, evitando la programación directa del código VHDL y permitiendo al usuario el uso de un entorno más familiar.

## 2. Metodología

El trabajo se divide en dos etapas, en la primera se emplea el entorno Matlab/Simulink R2017A para generar los pulsos de comando tipo SPWM necesarios para un inversor de 5 niveles, estos pulsos de comando se almacenan en vectores de datos para su manipulación y transferencia a la segunda etapa.

En la segunda etapa se emplea el entorno Matlab/Simulink R2013B el cual cuenta con una toolbox proporcionada por la empresa Xilinx que nos brinda un conjunto de bloques capaces de ser sintetizados del entorno grafico Simulink al entorno ISE (Integrated Synthesis Environment por sus siglas en inglés) mediante el compilador System Generator. Cabe destacar que el entorno ISE es el programa para desarrollar proyectos basados en código VHDL de la empresa Xilinx y el compilador System Generator solo es compatible para Matlab/Simulink R2013B o inferior y FPGAs Spartan 6 o anteriores.

### A. Generación de la modulación tipo SPWM en Simulink R2017A y procesamiento de los pulsos de comando

El procedimiento consiste en generar una señal moduladora senoidal y cuatro señales portadoras triangulares, todas basadas en un número de muestras por periodo, estas señales fueron comparadas mediante bloques lógicos booleanos obteniendo a la salida el tren de pulsos de comando correspondiente a cada comparación, este tren de pulsos está compuesto solo de valores cero y uno que hacen referencia al estado alto y bajo, la Fig. 2 muestra la disposición de los bloques empleados para la generación de los pulsos de comando tipo SPWM.

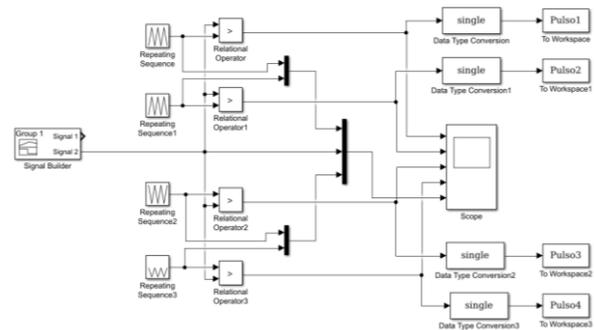


Fig 2. Bloques empleados en la generación de pulsos de comando.

La señal senoidal moduladora es generada con el bloque “Signal Builder” que se conecta en la entrada de los cuatro bloques de comparación, en la otra entrada de los bloques de comparación se conecta una de las cuatro señales triangulares portadoras provenientes de los bloques “Repeating Sequence”. Para las comparaciones efectuadas en los bloques “Relational Operator” y “Relational Operator 1” es necesario que la señal senoidal se ingrese por la entrada superior y en los bloques “Relational Operator 2” y “Relational Operator 3”, la señal senoidal debe conectarse en la entrada inferior, de no hacerlo de esta manera el pulso de comando a la salida de los bloques de comparación tendrá invertidos los estados alto y bajo.

Los pulsos resultantes de las comparaciones se procesan con los bloques “Data Type Conversion”, estos bloques convierten los valores booleanos de los bloques de comparación a un tipo

de dato numérico “single” que representa los estados alto y bajo como “1” y “0”, respectivamente, el resultado de esta conversión es entregada a los bloques “To Workspace” que guardan como vector de datos los valores 1 y 0 que conforman a los pulsos de comando provenientes de las comparaciones.

El resto de elementos del esquema de la Fig. 2 reúne las señales en el bloque “Scope” para visualizar las formas de onda procesadas, como se muestra en la Fig. 3.

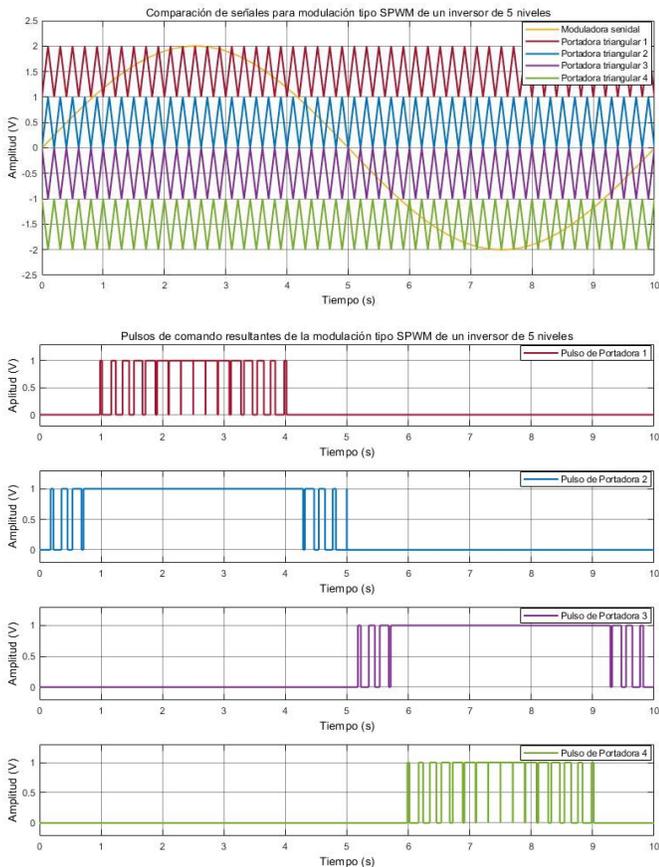


Fig 3. Modulación SPWM para inversor de 5 niveles y pulsos de comando resultantes para los puentes H del inversor.

Los vectores almacenados por los bloques “To Workspace” son abiertos con la ventana de comandos de Matlab y transferidos al programa Excel para guardarse como 4 archivos de nombres: “Pulso1, Pulso2, Pulso3 y Pulso4” con la configuración: “archivo de texto delimitado por comas” de terminación “.CSV”.

Los cuatro archivos de terminación “.CSV” donde se almacenó la información de los pulsos de comando tipo SPWM para el inversor 5 niveles serán empleados en el entorno Matlab/Simulink R2013B donde se desarrollará un esquema de bloques que dará paso a la programación del FPGA Spartan 6.

### B. Estructura de bloques y simulación del modelo en Simulink R2013B previo a la programación de la FPGA

Dentro del entorno Matlab/Simulink R2013B se emplean los bloques del toolbox proporcionado por la empresa Xilinx para la FPGA Spartan 6. En [11] se enlista una gran cantidad de bloques pertenecientes a esta toolbox con la descripción de sus capacidades, ahora se explicará de forma breve las funciones que realizan los bloques empleados en este modelo:

- **System Generator:** Bloque que permite generar la sintetización del modelo en Simulink a código VHDL, también permite configurar ciertos parámetros de esta sintetización.
- **Counter:** Este bloque al ser sintetizado genera dentro del FPGA un contador ascendente o descendente, el tamaño del contador y otras funciones son definidas desde la ventana de configuración del bloque.
- **Gateway Out:** Permite la interconexión de bloques del toolbox Xilinx con bloques propios del entorno Simulink, también en su configuración interna se define los pines que se emplean como entradas o salidas en la FPGA.
- **ROM:** Con este bloque se programa en la FPGA un espacio que servirá de memoria para alojar los valores de los cuatro archivos “.CSV” con los datos de los pulsos de comando.

En la Fig. 4 se presenta la estructura desarrollada en el entorno Simulink con los bloques descritos previamente.

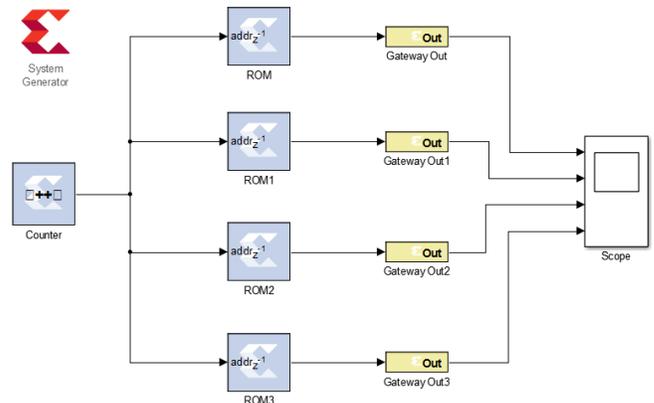


Fig 4. Estructura de bloques desarrollada para guardar los archivos “.CSV” con los pulsos de comando tipo SPWM para el inversor de 5 niveles.

El archivo “Pulso1.CSV” se asigna al bloque “ROM”, esto se realiza para los otros 3 bloques hasta finalizar con el archivo “Pulso4.CSV” para el bloque “ROM3”. Es importante mencionar que los archivos “.CSV” guardan los pulsos de comando en vectores de datos de 1000 muestras, por lo tanto, la configuración de los bloques contador y memoria ROM deben ser acordes a este número muestras. La simulación en el entorno Simulink también se ajusta a un periodo de 1000 segundos, la Fig. 5 muestra los resultados del bloque “Scope”.

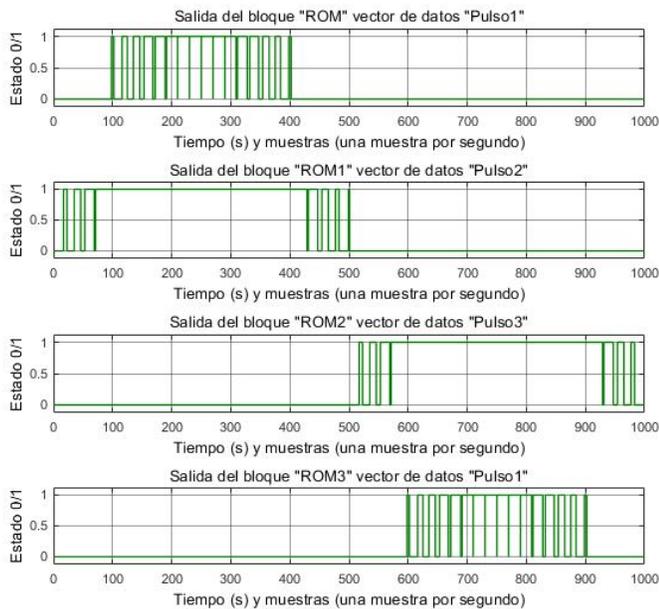


Fig 5. Pulsos de comando tipo SPWM ejecutados desde los bloques de memoria ROM del modelo desarrollado en Simulink R2013B.

Los resultados de la simulación de los bloques son una representación del código que se generará e implementará en la FPGA, los pulsos de comando visualizados en el “Scope” de la Fig. 5 deben ser iguales a los obtenidos con el osciloscopio al muestrear las salidas del FPGA una vez se ejecute el código.

### C. Sintetización de los bloques de Simulink con System Generator y generación del archivo “.bit” desde ISE

Después de verificar la configuración del modelo y los pulsos de comando mediante la simulación, se realiza la sintetización de los bloques empleando el compilador System Generator. Para la compilación es necesario definir los parámetros referentes a la versión de FPGA para la cual se realiza la sintetización: el lenguaje de descripción empleado (VHDL), directorio dónde se alojarán los archivos resultantes de la sintetización y un parámetro muy importante es definir el reloj principal (Generador de pulsos) que se utilizará.

Todos los circuitos secuenciales (como el bloque “Counter”) que se desarrollan en una FPGA están sujetos a un reloj principal que dicta la frecuencia de operación base del sistema embebido. Las tarjetas de desarrollo por lo general disponen de un oscilador de cristal capaz de generar pulsos con frecuencias en el orden de los Megahertz, esta es una de las ventajas de las FPGA sobre los microcontroladores.

El compilador System Generator brinda la opción de emplear el reloj interno (el oscilador de cristal) o la posibilidad de emplear un reloj externo, que puede ser cualquier otro

dispositivo capaz de generar pulsos (comúnmente a frecuencias menores), como un generador de funciones o un microcontrolador maestro. Se optó por configurar el uso de un reloj externo.

Una vez definidos todos los parámetros, se realizó la compilación de los bloques, se generó un proyecto basado en los archivos resultantes de la sintetización, y posteriormente, se abrió con el programa ISE. Dentro de este entorno solo es necesario volver a sintetizar el código previamente procesado por el compilador System Generator, implementar el diseño que describe el código VHDL y generar un archivo de terminación “.bit”.

Este archivo de terminación “.bit” contiene el diseño lógico que se implementará en la FPGA, para el caso de este proyecto se encuentra el contador y las memorias ROM con los pulsos de comando tipo SPWM. El archivo “.bit” también contiene el direccionamiento de las entradas y salidas de pulsos, para este caso la única entrada es el reloj externo y las cuatro salidas que corresponden a cada pulso de comando almacenado en las memorias ROM, la definición de los pines de salida se efectuó desde el modelo basado en bloques del entorno Simulink dentro de la configuración de los bloques “Gateway Out”.

### D. Desarrollo de un reloj externo de señal cuadrada basado en un microcontrolador montado en la tarjeta Arduino

Como se mencionó en la subsección anterior el modelo de bloques desarrollado en simulink se configuró para emplear un reloj externo, esto con el propósito de tener la versatilidad de cambiar la frecuencia del oscilador (y con ello la frecuencia de los pulsos de comando SPWM) de forma manual y según sea requerido, tarea que podría complicarse si se utiliza el oscilador interno de la placa, ya que sería necesario el uso de divisores de frecuencia programados directamente en el modelo a bloques de Simulink.

Para fines demostrativos, considerando que la frecuencia del reloj en esta aplicación es baja y basados en lo visto en la referencia [12], se empleó un microcontrolador ATmega328P montado en una placa de desarrollo Arduino UNO para generar un pulso de baja frecuencia con el cual las mil muestras de los vectores de datos en las memorias ROM se repitiera en ciclos de 16.6 ms o 60 Hz.

### E. Pruebas y resultados

Con los pulsos de comando implementados en la FPGA y el oscilador externo conectado, se procedió a medir las salidas del FPGA para visualizar los pulsos de comando tipo SPWM. La Fig. 6 muestra las pruebas realizadas en el laboratorio.

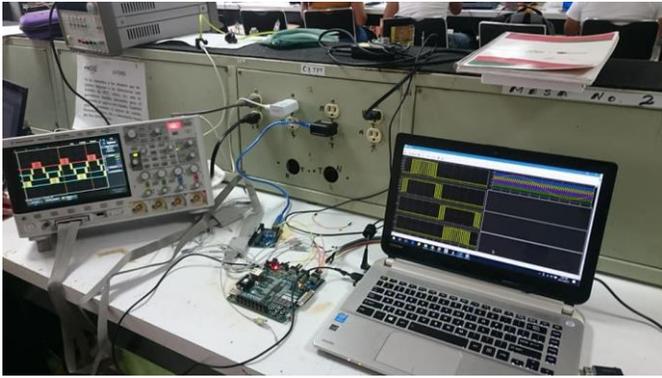


Fig 6. Pruebas de laboratorio realizadas al FPGA Spartan 6 con los pulsos de comando tipo SPWM implementados.

Al muestrear las salidas se pudo corroborar gráficamente que los pulsos de comando tipo SPWM entregados por el FPGA corresponden con los generados desde el modelo a base de bloques del entorno Simulink. La Fig. 7 muestra una captura de pantalla del osciloscopio con los cuatro pulsos de comando.

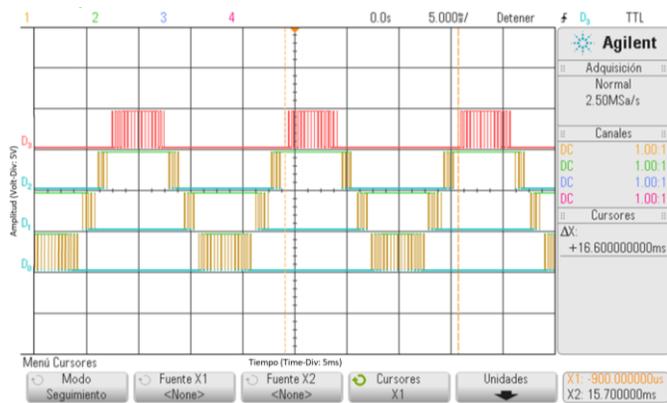


Fig 6. Pulsos de comando entregados por el FPGA y presentados desde la pantalla del osciloscopio.

También se usaron los cursores para medir un ciclo de cada uno de los 4 pulsos de comando, se corroboró que todos los pulsos son periódicos, no presentan distorsiones, retardos o desfases, y todos cuenta con un periodo de 16.6 ms o 60 Hz de frecuencia por ciclo.

### 3. Conclusiones

En la introducción de este artículo se mencionó las desventajas de emplear sistemas embebidos basados en microcontroladores o microprocesadores por la existencia de retardos o desfases en los pulsos de salida. Sin embargo, en la sección 2, apartado “D. Desarrollo de un reloj externo de señal cuadrada basado en un microcontrolador montado en la tarjeta Arduino” se comenta el uso de un microcontrolador para regir los pulsos del FPGA, esta situación puede resultar confusa para el lector. Por eso es importante retomar los siguientes puntos:

1 - La generación de los pulsos de comando tipo SPWM se pudo llevar a cabo empleando el reloj interno del FPGA, pero se exploró la alternativa de emplear el reloj externo para presentar una función adicional al programar desde el entorno a bloques de Simulink.

2 - El uso combinado de microcontroladores y FPGAs se efectúa asignando las tareas de baja frecuencia a los microcontroladores y las tareas que de alta frecuencia a las FPGAs. Es común emplear microcontroladores con algoritmos de control o instrucciones para la adquisición de datos por parte de sensores, debido a que los microcontroladores cuentan con convertidores ADC internos, elementos que no vienen integrados en una FPGA por tratarse de un dispositivo puramente lógico digital.

3 - Las FPGA cuentan con la ventaja de proporcionar pulsos de altas frecuencias sin ningún tipo de distorsión, pero la programación en código VHDL dificulta la elaboración de algoritmos complejos dentro de estos dispositivos. Estas tareas son mejor solventadas por los microcontroladores y sus respectivos lenguajes de programación.

En lo referente a los resultados obtenidos, se puede observar que el método desarrollado mediante programación a bloques desde el entorno de Simulink, es capaz de llevar a la realidad las funciones previamente configuradas en simulación.

Este método permite la implementación de pulsos de comando tipo SPWM de múltiples niveles en tiempos mucho menores a los que serían necesarios si se escribiera directamente el código en lenguaje VHDL.

Esta herramienta no queda limitada a la generación de los pulsos tipo SPWM. Gracias al gran apartado de bloques que se ofrece dentro del entorno Simulink, existen opciones para desarrollar otro tipo de tareas como controles PID o filtrado, cubriendo parte de la desventaja de la programación en lenguaje VHDL mencionada en el punto número 3.

### 4. Referencias

- [1] L. L. G. Franquelo, J. Rodriguez, J. I. Leon, S. Kouro, R. Portillo and M. A. M. Prats, "The age of multilevel converters arrives," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 28-39, June 2008.
- [2] J. Rodriguez, Jih-Sheng Lai and Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [3] M. J. John and J. Jose, "A new three phase step up multilevel inverter topology for renewable energy applications," *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, 2016, pp. 1-5.
- [4] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-17, no. 5, pp. 518-523, Sept. 1981.
- [5] A. Ghazanfari, H. Mokhtari and M. Firouzi, "Simple Voltage Balancing Approach for CHB Multilevel Inverter Considering Low Harmonic Content Based on a Hybrid Optimal Modulation Strategy," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 4, pp. 2150-2158, Oct. 2012.

- [6] T. N. B. Anh and S. Tan, "Real-Time Operating Systems for Small Microcontrollers," in *IEEE Micro*, vol. 29, no. 5, pp. 30-45, Sept.-Oct. 2009.
- [7] S. Pujari, A. Yeotkar, V. Shingare, S. Momin and B. Kokare, "Performance analysis of microcontroller and FPGA based Signal Processing a case study on FIR filter design and implementation," 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, 2015, pp. 252-257.
- [8] L. Jian, Z. Zhe, Y. Xianggen and W. Minghao, "FPGA Implementation of a Multi-Level SPWM for Three-Level NPC Inverter," Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference, Newcastle-upon-Tyne, 2006, pp. 175-179.
- [9] K. Vijayakumar, R. A. Kumar, A. Govindasamy and S. Kannan, "Implementation of Sinusoidal Pulse Width Modulation for Matrix Converter using FPGA," 2014 International Conference on Communication and Signal Processing, Melmaruvathur, 2014, pp. 887-890.
- [10] I. F. Moran, J. A. Restrepo, M. L. Orozco and J. M. Ramirez, "Quasi-switched inverter using space vector pulse width modulation with triangular comparison for photovoltaic applications," *TecnoLógicas*, 2018, vol. 21, no 42, p. 95-110.
- [11] M. Gutierrez, "Evaluación de herramientas de alto nivel para diseño hardware", Proyecto fin de carrera, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2007.
- [12] B. Caglar, E. Caglav and I. Cadirci, "Combined microcontroller and FPGA control of flyback inverter using a System-on-Chip device," 2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, Antalya, 2014, pp. 990-995.



**Javier Chacha Coto** se graduó de la licenciatura en Ingeniería Industrial en el Instituto Tecnológico de Campeche, Campeche, México, en 2002. Actualmente se encuentra adscrito como estudiante al programa de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Internacional Iberoamericana.

## 5. Biografías



**Benjamín Chavarría Domínguez** nació en San Andrés Tuxtla Veracruz, México. Se graduó de la licenciatura en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Minatitlán, Minatitlán, México, en 2018. Actualmente se encuentra adscrito como estudiante al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica con la especialidad en Electrónica de Potencia del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Temas de interés: inversores multinivel, sistemas digitales basados en FPGA y microcontroladores, programación en entornos visuales y de bloques como Simulink, LabVIEW e Icestudio.



**Jesús Aguayo Alquicira** obtuvo su doctorado en Tecnológico (CENIDET) en 2004. Desde 2006, trabaja en el CENIDET como profesor a tiempo completo. Sus áreas de investigación son el sistema tolerante a fallos y la caracterización de dispositivos semiconductores de potencia. Tiene experiencia en otros temas relacionados, como inversores multinivel y accionamientos ingeniería electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo de motores de inducción.



**Susana De León-Aldaco** recibió el título de maestría en ciencias y doctorado. en Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en 2011 y 2016, respectivamente. Desde 2017 es profesora de tiempo completo en la Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI). Sus intereses de investigación incluyen sistemas de energía, optimización metaheurística y confiabilidad de convertidores de energía.

# Diseño y construcción de un inversor trifásico con modulación SPWM

Adolfo Valdez Bahena<sup>1,a</sup>, Susana E. De León Aldaco<sup>2,b</sup>, Jesus Aguayo Alquicira<sup>1,c</sup>, Amelia C. Rangel Pérez<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Depto. de Ingeniería Electrónica

<sup>2</sup> Universidad Internacional Iberoamericana, Depto. de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> adolfo.valdez18ee@cenidet.edu.mx, <sup>b</sup> susana.deleon@unini.edu.mx, <sup>c</sup> jaguayo@cenidet.edu.mx, <sup>d</sup> ameliarangel@hotmail.com

**Resumen**— El uso del inversor puente completo trifásico y la técnica de modulación SPWM presenta la ventaja de reducir el contenido armónico en la forma de onda de la tensión de salida, mejorando la calidad de la energía suministrada desde el inversor a la carga. En este artículo se presenta el diseño y construcción de un inversor puente completo trifásico, aplicando la técnica de modulación por ancho de pulso senoidal. Se analiza su principio de operación mediante simulaciones en el software PSpice® y en pruebas experimentales utilizando una carga resistiva conectada en estrella.

**Palabras clave.** Inversor Trifásico, Modulación SPWM, Convertidor CD-CA, Electrónica de Potencia.

## 1. Introducción

El uso de la energía eléctrica es indispensable en cualquier lugar y en todo momento. En espacios donde no llega la red pública, es necesario utilizar sistemas de energía renovables. Sin embargo, la mayoría de estos sistemas (como la energía solar o la energía eólica) producen señales de corriente directa (CD), mientras que la mayoría de aparatos eléctricos funcionan con corriente alterna (CA) [1].

La principal ventaja que tiene la corriente directa frente a la corriente alterna, es que se puede almacenar en baterías, sin embargo, para transmitir en CD la distancia debe ser mayor a 500 km y la potencia mayor a 1000 MW, si la distancia es menor, es más económico una transmisión en CA, esto se debe a los altos costos de los equipos para convertir la energía de CA a CD y viceversa [1]. Debido a lo anterior y con el fin de aprovechar al máximo la energía, existe el interés por desarrollar sistemas más eficientes que permitan convertir la corriente directa a corriente alterna.

El inversor es un circuito electrónico capaz de generar una señal de corriente alterna, con amplitud y frecuencia variable, a partir de fuentes de CD. Para funcionar correctamente, el inversor necesita uno o varios voltajes de entrada de corriente directa y un conjunto de Dispositivos Semiconductores de Potencia (DSEP) sujetos a una acción de control para producir un voltaje de salida de corriente alterna.

Una de las formas de clasificar a los inversores es dependiendo del tipo de alimentación: 1) Inversores alimentados por corriente o, 2) Inversores alimentados por tensión. Otra forma de clasificar a los inversores es: Inversores de medio puente e Inversores puente completo. Dependiendo del número de fases, el inversor puente completo puede ser monofásico o trifásico.

El inversor alimentado en tensión puente completo trifásico es la topología más utilizada en los accionamientos eléctricos en baja y mediana potencia [2].

Los inversores utilizan DSEP con activación y desactivación controlada como lo son los transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT, por sus siglas en inglés *Insulated Gate Bipolar Transistor*). La secuencia de conmutación que siguen los dispositivos IGBT viene impuesta por un proceso previo de modulación que determina las características de la señal de salida, entre ellas: forma, amplitud, frecuencia y contenido armónico [2, 3]. La técnica más utilizada para generar ondas senoidales a la salida de un inversor puente completo es la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés *Pulse Width Modulation*).

En este artículo se analiza el funcionamiento del inversor puente completo trifásico aplicando la técnica de modulación por ancho de pulso senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés *Sinusoidal Pulse Width Modulation*). Para abordar este tema el artículo está organizado de la siguiente manera:

En la Sección 1 se remarca la importancia de la conversión de energía CD a CA y las principales áreas de aplicación de los inversores. En la Sección 2 se analiza el principio de funcionamiento del inversor puente completo trifásico. Los fundamentos de la técnica de modulación SPWM, se encuentran en la Sección 3. En la Sección 4 se explica la metodología seguida para realizar las simulaciones y la construcción del inversor trifásico. En la sección 5 se presentan los resultados alcanzados con las simulaciones y las pruebas experimentales. Finalmente, en la Sección 6 se presenta un resumen de las principales conclusiones obtenidas de este estudio.

## 2. Inversor puente completo trifásico

En la Figura 1 se muestra un inversor trifásico convencional formado por un conjunto de seis dispositivos semiconductores de potencia, con seis diodos en antiparalelo alimentados por una fuente de voltaje de CD. Cada par transistor-diodo opera en los estados de corte o saturación comportándose como un interruptor que conduce en ambos sentidos; la carga trifásica (normalmente un motor de inducción trifásico) se conecta entre las fases A, B y C.

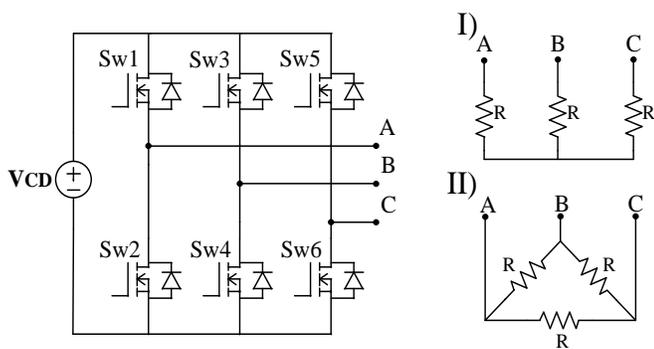


Fig. 1. Inversor puente completo trifásico, con carga conectada en I) Estrella o II) Delta

En un inversor puente completo trifásico, se tienen ocho estados de conmutación posibles, donde los estados S1-S6 se denominan estados de conmutación activos, es decir, conectan la carga a una diferencia de potencial ( $V_{DC+}$ ,  $V_{DC-}$ ). Los estados de conmutación S0 y S7 se denominan estados cero, en este caso, la carga se cortocircuita utilizando los interruptores inferior o superior [4]. En la Figura 2 se muestra la configuración de los ocho estados de operación del inversor puente completo trifásico.

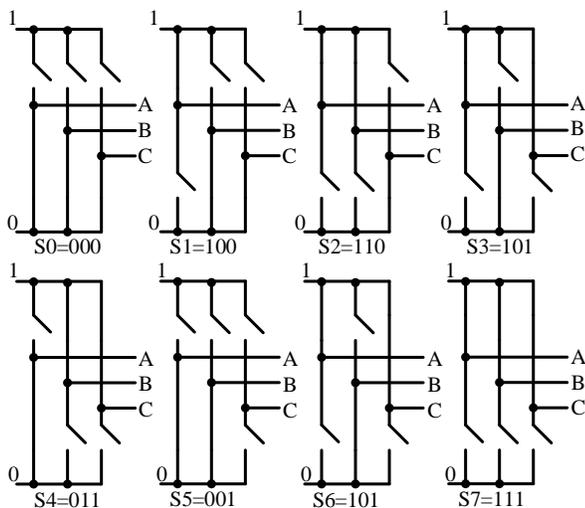


Fig. 2. Configuración de los 8 estados de operación posibles de un inversor puente completo trifásico

Normalmente, el estado de los interruptores se obtiene a partir de la comparación de la amplitud de una señal de referencia denominada señal moduladora y una señal portadora, en el caso más simple se utilizan una señal senoidal y una triangular, respectivamente. A este método se le conoce como modulación por ancho de pulso [4].

### 3. Técnica de modulación PWM senoidal

Idealmente la tensión a la salida del inversor es una onda senoidal pura, sin embargo, ciertas condiciones pueden provocar una distorsión armónica en las tensiones, provocando efectos desfavorables en determinados tipos de carga conectadas al inversor, por ejemplo, bajo factor de potencia, corrientes de tercer armónico en los cables de neutro, sobrecalentamiento y vibraciones en los motores, reducción de potencia de los transformadores y en general de la potencia total instalada en la red, entre otros [4-6].

El uso de técnicas de modulación PWM permite reducir las pérdidas por conmutación, mejorar la eficiencia del inversor y reducir el contenido armónico de la tensión de salida. Actualmente existe gran variedad de técnicas de modulación utilizadas en el control de inversores trifásicos; la más empleada es la modulación PWM senoidal [5, 6].

La modulación PWM senoidal consiste en comparar una señal senoidal ( $V_{m1}$ ) con una señal triangular ( $V_{p1}$ ), para generar una onda cuadrada de frecuencia constante con duración de pulso variable ( $V_{sw1}$ ), controlando la cantidad de energía entregada a la carga (ver Figura 3). El voltaje eficaz medido en la carga depende de la relación entre la señal deseada a la salida y la frecuencia de la señal triangular. La ventaja principal de PWM son las bajas pérdidas en los dispositivos de conmutación [7].

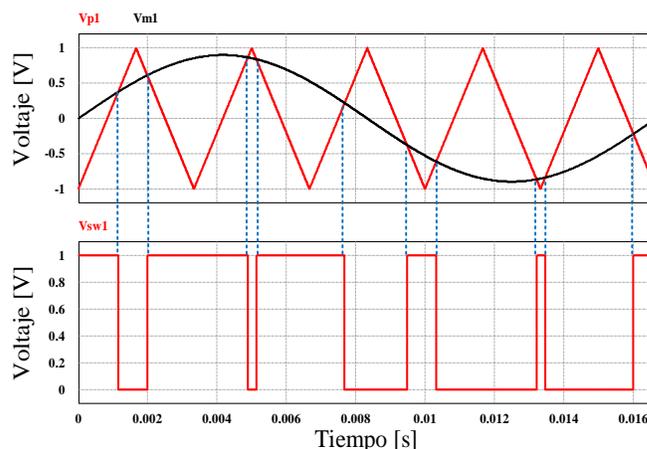


Fig. 3. Principio de modulación PWM senoidal

En la Figura 4 se muestra el esquema de modulación SPWM para un inversor trifásico de 2 niveles. Para generar las señales de activación de los interruptores que integran el inversor, se necesitan tres señales senoidales (una por fase), desplazadas  $120^\circ$  entre sí, y una o más señales portadoras triangulares (dependiendo del número de niveles deseados en la salida).

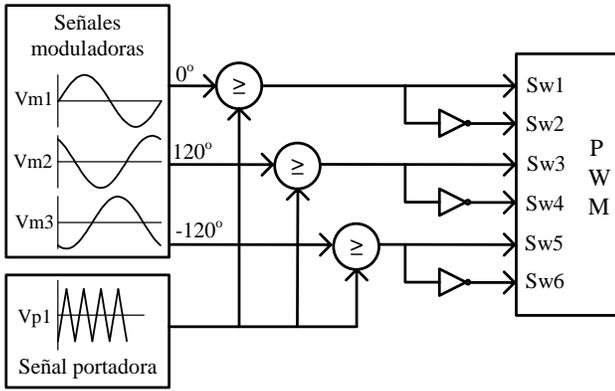


Fig. 4. Esquema de modulación SPWM para inversor trifásico

La señal moduladora contiene la información de amplitud, frecuencia y fase deseadas de la señal a la salida del inversor, por esta razón se le conoce también como señal de referencia [8, 9]. La expresión algebraica que define la señal moduladora senoidal ( $V_{mi}$ ) está dada por:

$$V_{mi} = A_{mi} \sin(2\pi f_{mi} t) \quad (1)$$

Donde:

- $A_{mi}$ : Amplitud de la señal moduladora (Volts, V).
- $f_{mi}$ : Frecuencia de la señal moduladora (Hertz, Hz).
- $t$ : Tiempo (segundos, s).

La señal portadora define la frecuencia de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia, el nivel de pérdidas por conmutación y la distorsión armónica total de la señal de voltaje a la salida del inversor [8]. Generalmente se utiliza una señal periódica triangular cuya función característica viene dada por:

$$V_{p1} = A_{p1} \left[ \frac{2}{\pi} \arcsin \left( \sin \left( 2\pi f_{p1} t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right] \quad (2)$$

Donde:

- $A_{p1}$ : Amplitud de la señal portadora (Volts, V).
- $f_{p1}$ : Frecuencia de la señal portadora (Hertz, Hz).

Se define como índice de modulación de amplitud ( $m$ ), al cociente entre la amplitud pico de la señal moduladora y la amplitud pico de la señal portadora, tal como se muestra en la ecuación 3:

$$m = A_{mi} / A_{p1} \quad (3)$$

La relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de la moduladora, se le denomina índice de modulación de frecuencia ( $fm$ ) y se expresa de la siguiente manera:

$$f_m = f_{mi} / f_{p1} \quad (4)$$

Usualmente la amplitud de la señal moduladora es variable, con el fin de controlar la amplitud pico de la componente fundamental de la forma de onda del voltaje de salida. Mientras que la amplitud de la señal triangular permanece constante.

En la Figura 5 se muestran las señales para la fase A, utilizando la técnica de modulación SPWM con un índice de modulación de amplitud  $m=0.9$  y un índice de frecuencia  $fm=60$ .

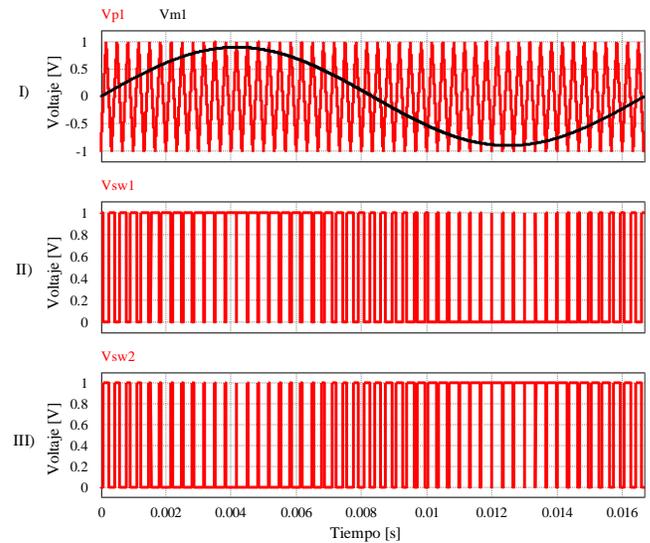


Fig. 5. Señales de disparo utilizando la técnica SPWM. I) Señales moduladora y portadora para la fase A, II) y III) Señales para los interruptores  $S_{w1}$  y  $S_{w2}$

## 4. Inversor trifásico con modulación SPWM

### A. Simulación del inversor trifásico

Con la finalidad de analizar el funcionamiento del inversor puente completo trifásico aplicando la técnica de modulación SPWM, se simuló el circuito que se muestra en la Figura 6 en el software PSpice®. Los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 1. Se analizaron los voltajes de fase y de línea obtenidos en los terminales de la carga, así como la distorsión armónica total en la señal de voltaje.

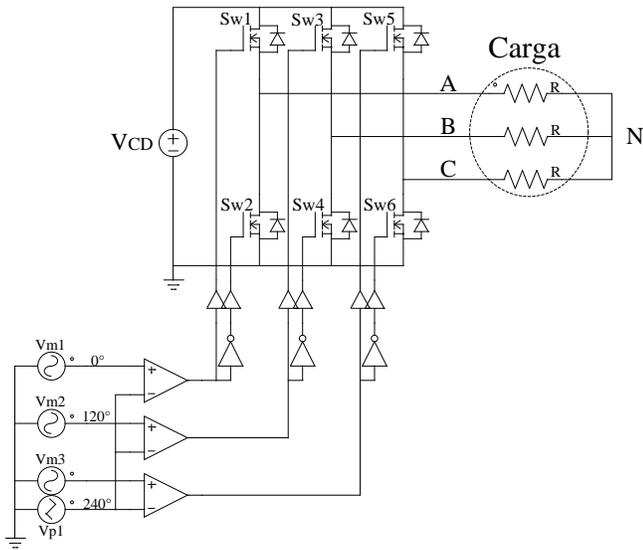


Fig 6. Diagrama del inversor trifásico con modulación SPWM

TABLA I. PARÁMETROS UTILIZADOS EN SIMULACIÓN

Parámetro	Valor
Tensión de entrada (VCD)	150 V
Resistencia de carga (R)	15.6 $\Omega$
Amplitud de moduladora ( $A_{m1}$ )	0.9 V
Frecuencia de portadora ( $f_{p1}$ )	3.6 kHz
Amplitud de portadora ( $A_{p1}$ )	2 V
Frecuencia de moduladora ( $f_{p1}$ )	60 Hz
Tiempo de simulación	50 ms
Step time	277 ns

Un análisis comparativo de los resultados obtenidos en simulación y experimentalmente, se presentan en la Sección 5. Resultados.

## B. Construcción del inversor puente completo trifásico

En este apartado, se describe cada uno de los bloques que integran el inversor puente completo trifásico.

### 1. Etapa digital

Esta etapa consiste en desarrollar el código para la implementación de las técnicas de modulación. Su función principal, es generar las señales PWM para los transistores de potencia que integran el inversor. En este caso, se utilizó una tarjeta FPGA Altera Cyclone II programada con el software Quartus II empleando el lenguaje VHDL.

### 2. Etapa de aislamiento

La etapa de aislamiento permite proteger la etapa digital del ruido generado por la conmutación de los transistores y otros posibles fallos en la etapa de potencia. Para esta función, se seleccionó el circuito integrado HCPL2631.

### 3. Etapa de potencia

Esta etapa consiste en un inversor, cuya función es convertir un voltaje de corriente directa a un voltaje de corriente alterna. En este caso se utiliza el módulo IRAM136-1561A. Internamente este módulo presenta la configuración típica de un inversor puente completo trifásico. Cuenta con seis dispositivos IGBT los cuales soportan un voltaje de bloqueo directo de 600 V, una corriente de 15 A @ 25 °C y una frecuencia de operación de hasta 20 kHz.

### 4. Carga

Se utiliza una carga resistiva compuesta por 3 lámparas incandescentes de 75 W conectadas en estrella. Aunque el módulo IRAM136-1561A está enfocado hacia aplicaciones industriales, por lo que es posible alimentar motores de inducción trifásicos de baja potencia (<3kW).

Para la evaluación experimental del inversor, se utilizó el banco de pruebas experimentales que se muestra en la Figura 7. La Sección marcada con la letra A corresponde al FPGA, en B se encuentran la etapa de aislamiento y el inversor puente completo trifásico, en el recuadro marcado con la letra C se encuentran las fuentes de alimentación de 15V y 150V para la etapa digital y el inversor, respectivamente. Posteriormente, en la Sección D se encuentra la carga trifásica, finalmente, en el recuadro E se encuentra el analizador de calidad de la energía (Hioki PW3198) y el osciloscopio digital, utilizados para medir los voltajes y la distorsión armónica total (THD).

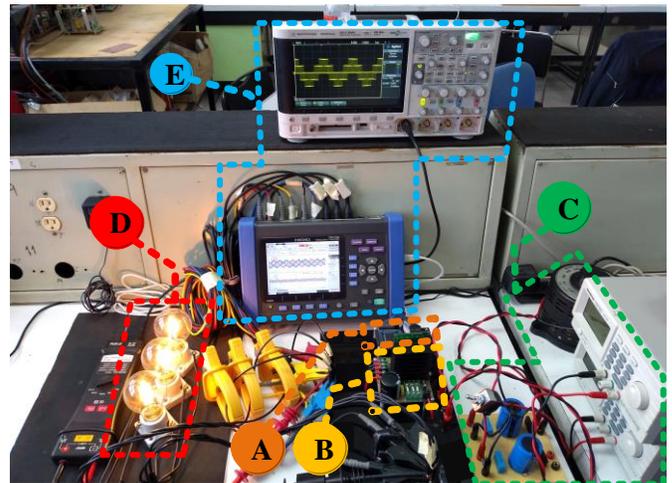


Fig 7. Banco de pruebas experimental del inversor puente completo trifásico

## 5. Resultados

Para comprobar el correcto funcionamiento de todas las etapas que integran el inversor, se realizaron las pruebas en lazo abierto, los resultados se muestran a continuación:

### A. Simulación

En la Figura 8 se muestra la forma de onda obtenida con la técnica de modulación SPWM mediante simulación, I) medida de la fase A al neutro ( $V_{AN}$ ) y II) medida de la fase A con respecto a la fase B ( $V_{AB}$ ). Debido a la conexión en estrella sin neutro se tiene una forma de onda de 5 niveles en el voltaje  $V_{AN}$ . Mientras que en el voltaje  $V_{AB}$  se tienen 3 niveles (+VCD, 0, -VCD).

### B. Experimental

En la Figura 9 se muestra la forma de onda obtenida experimentalmente, I) medida de la fase A al neutro ( $V_{AN}$ ) y II) medida de la fase A con respecto a la fase B ( $V_{AB}$ ). Se puede observar que los resultados obtenidos experimentalmente son muy similares a los que se obtuvieron mediante simulación.

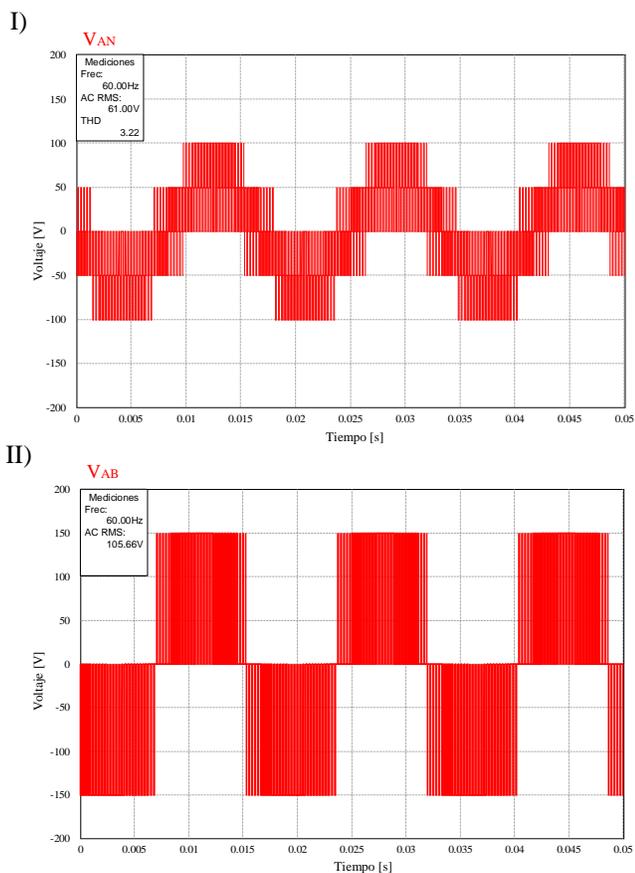


Fig 8. Voltaje obtenido mediante simulación I) fase A al neutro ( $V_{AN}$ ) y II) fase A con respecto a la fase B ( $V_{AB}$ )

El uso del inversor puente completo trifásico y la técnica de modulación SPWM presenta la ventaja de reducir el contenido armónico en la forma de onda de la tensión de salida, THD=3.22 en simulación y THD=3.75 experimentalmente (ver Figuras 7 y 8). Debido a que la componente fundamental se encuentra a la frecuencia de la señal moduladora y las demás componentes se ubican a la frecuencia de la portadora, facilitando el filtrado de la señal de salida.

## 6. Conclusiones

En este artículo se diseñó e implementó un inversor puente completo trifásico utilizando la técnica de modulación SPWM. Se verificó su funcionamiento mediante simulaciones en el software PSpice®. Los resultados obtenidos de manera experimental y en simulación respaldan el buen desempeño del inversor diseñado en cuanto al voltaje y THD obtenidos. Para las pruebas que se presentan en este documento se utilizó una carga resistiva conectada en estrella, sin embargo, el prototipo construido es capaz de accionar motores de hasta 3 kW.

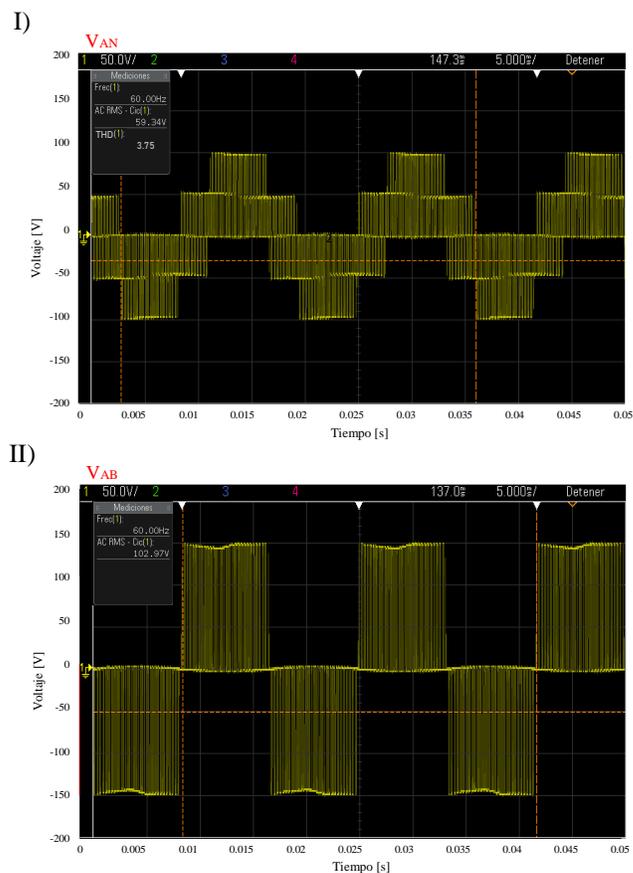


Fig 9. Voltaje obtenido experimentalmente I) fase A al neutro ( $V_{AN}$ ) y II) fase A con respecto a la fase B ( $V_{AB}$ )

## 7. Referencias

- [1] L. M. D. Jimena, C. M. G. Alberto, D. Chávez, J. Oscar, and G. L. C. Alberto, "Modulación PWM aplicada a inversores trifásicos dentro del esquema de accionamientos eléctricos AC," Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones (FIET), 2007.
- [2] A. T. Alejandro, P. R. Javier, and B. J. J. Antonio, "Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F2431," trabajo, vol. 2, p. 2.
- [3] J. D. González, "Inversores PWM," Lección de oposición para optar a la plaza de profesor titular de la Universidad de Oviedo, 1999.
- [4] J. Posada Contreras, "Modulación por ancho de pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM). Una introducción a las técnicas de modulación," *El Hombre y la Máquina*, no. 25, 2005.
- [5] I. Hwang, K. Ahn, H. C. Lim, and S. Kim, "Design, development and performance of a 50 kW grid connected PV system with three phase current-controlled inverter," in *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-2000* (Cat. No. 00CH37036), 2000, pp. 1664-1667.
- [6] A. T. Alejandro, P. R. Javier, and B. J. J. Antonio, "Inversor trifásico SPWM para el control de velocidad de un motor de inducción implementado en el microcontrolador PIC18F2431," trabajo, vol. 2, p. 2.
- [7] C. A. Torres, D. Murillo, and C. A. R. Patiño, "Diseño y construcción de un inversor trifásico," *Scientia et Technica*, vol. 3, no. 40, 2009.
- [8] T. Ohnishi, "Three phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control," in *Proceedings IECON'91: 1991 International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1991, pp. 819-824.
- [9] T. Ohnishi and H. Okitsu, "A novel PWM technique for three-phase inverter/converter," *The transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan. B*, vol. 105, no. 2, pp. 176-183, 1985.
- [10] H. L. Liu, G.-H. Cho, and S. S. Park, "Optimal PWM design for high-power 3-level inverter through comparative-studies," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, no. 1, pp. 38-47, 1995.
- [11] C. A. L. Noreña, "Análisis y simulación de algunas estrategias de control SPWM y SVPWM en corriente para un puente inversor," Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías. Ingeniería, 2008.
- [12] M. Lakka, E. Koutroulis, and A. Dollas, "Development of an FPGA-based SPWM generator for high switching frequency DC/AC inverters," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 356-365, 2013.
- [13] R. Langella, A. Testa, and E. Alii, "Ieee recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems," 2014.
- [14] M. P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 45, no. 5, pp. 691-703, 1998.
- [15] L. A. T. Grisales, "Diseño e implementación de un inversor trifásico multinivel con fijación por diodos," Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías. Eléctrica, 2010.

## 8. Biografías



**Adolfo Valdez-Bahena.** Ingeniero Electromecánico por el Instituto Tecnológico de Zacatepec, en 2018. Actualmente, estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica en el CENIDET. Sus áreas de interés son: convertidores de potencia particularmente inversores multinivel.



**Susana De León-Aldaco** recibió el título de maestría en ciencias y doctorado. en Ingeniería Electrónica del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), en 2011 y 2016, respectivamente. Desde 2017 es profesora de tiempo completo en la Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI). Sus intereses de investigación incluyen sistemas de energía, optimización metaheurística y confiabilidad de convertidores de energía.



**Jesús Aguayo Alquicira** obtuvo su doctorado en ingeniería electrónica en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en 2004. Desde 2006, trabaja en el CENIDET como profesor a tiempo completo. Sus áreas de investigación son el sistema tolerante a fallos y la caracterización de dispositivos semiconductores de potencia. Tiene experiencia en otros temas relacionados, como inversores multinivel y accionamientos de motores de inducción.



**Amelia Concepción Rangel Pérez.** Ingeniero químico por la universidad autónoma del Carmen, diciembre 2014. Actualmente, estudiante de Maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Internacional Iberoamericana. Sus áreas de interés son: optimización de procesos industriales en el área electrónica y química.

# CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR DEFASADOR

A. de León de León<sup>1a</sup>, H. Ruiz Ayala<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Madero, Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

<sup>a</sup> deleon\_al@yahoo.com.mx

**Resumen**— Se presentan la implementación de un *Transformador Defasador* trifásico (figura 12), desarrollado en el Instituto Tecnológico de Cd. Madero, el cual consta de tres módulos monofásicos que permiten realizar diferentes tipos de conexiones tales como: delta con alimentación central (figura 5), delta con alimentación lateral (figura 6), estrella con alimentación lateral (figura 7), estrella con alimentación central (figura 8), y delta-hexagonal (figura 9). Para el control de las derivaciones para controlar el flujo de potencia, se utilizó un PLC, marca *SIMATIC*, modelo *S5-100U*. La conexión que se presenta en este trabajo es la de *Delta-Hexagonal*. Para la parte del control de las derivaciones del transformador se utilizaron relevadores marca Telemecanique tipo electromecánico con bobina de 24 volts de Cd, y la acción mecánica de potencia se realizó con otros relevadores de la misma marca, pero con bobinas de control de 110 volts de corriente alterna. Además se presenta la secuencia de operación de los tapas o derivaciones, tanto en forma ascendente como descendente.

**Palabras clave:** Transformador defasador, conexión delta-hexagonal

## 1. Introducción

El transformador regulante se utiliza para controlar el flujo de potencia real a través de una trayectoria particular en el sistema. El flujo de potencia real  $P$  se ajusta con el control del ángulo de fase y el flujo de potencia reactiva  $Q$  con el control de la magnitud (figura 1). El uso del *transformador regulante para el control del ángulo de fase*, también llamado *Phase Shifting Transformer (PST)*, que en español significa, *transformador defasador (TD) o regulador de ángulo de fase*, puede ayudar a controlar el flujo de potencia real en líneas de transmisión y sistemas interconectados.

Supongamos que debido a sus características de construcción, la capacidad de transmisión de potencia de la Línea de Transmisión 2 sea menor que la de la Línea de Transmisión 1; pero su impedancia sea menor; por lo que el flujo de potencia real trataría de circular por la Línea de Transmisión 2, sobrecargándose esta Línea de Transmisión, y reduciéndose la capacidad de transmisión de este sistema. En este caso se necesita la instalación de un Transformador Defasador, para regular el flujo de potencia real en el sistema, y aumentar de esta manera la capacidad de transmisión del sistema de Transmisión, en forma global. Véase figura 1.

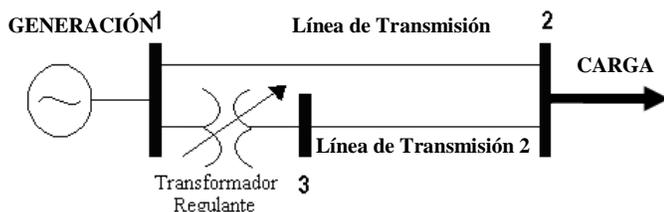


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema de prueba para el control del flujo de potencia

Los *Transformadores Defasadores* pueden ser construidos con diferentes configuraciones de devanados, dependiendo de las relaciones de voltaje, salida de potencia y cantidad de defasamiento.

La figura 2 muestra el esquema de un transformador regulante para controlar la magnitud del voltaje y el ángulo de fase, y en la figura 3 se

muestra el esquema de un transformador regulante que solo controla el ángulo de fase.

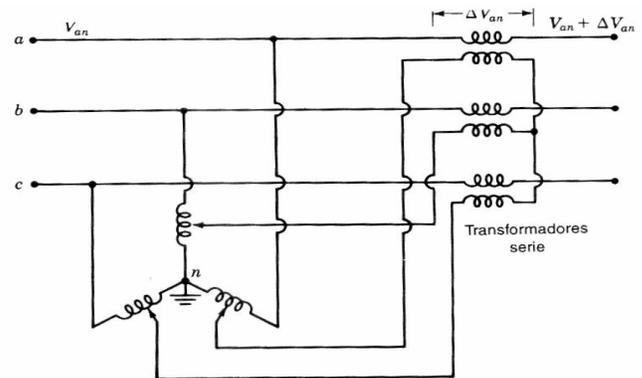


Figura 2. Diagrama de transformador regulante para el control de la magnitud y ángulo del voltaje.

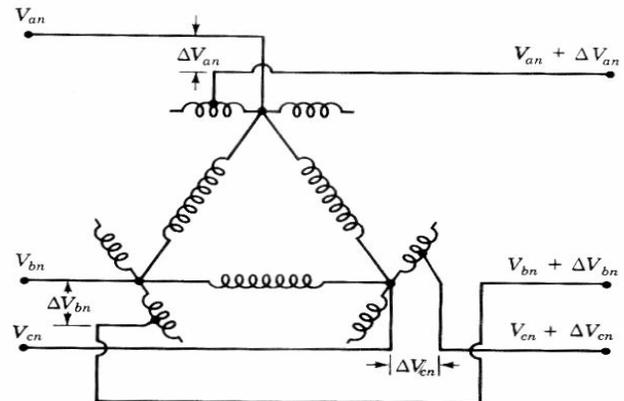


Figura 3. Transformador regulante para el control del ángulo de fase. Los devanados dibujados paralelo uno con el otro están en el mismo núcleo magnético.

**Descripción del desarrollo de un Transformador Defasador, con conexión Delta-Hexagonal**

**Características del Transformador regulante de ángulo de fase o Transformador Defasador**

Se mandó construir tres transformadores monofásicos para lograr controlar la magnitud y el ángulo del voltaje, pero debido a la construcción solo se puede controlar una variable a la vez. En este proyecto se utilizó para controlar el ángulo del voltaje; en la figura 4 se muestra una fase del transformador, con sus terminales en el exterior para el cambio de taps en el devanado secundario. Este transformador tiene su devanado primario (lado derecho de la figura 4) y su devanado secundario (lado izquierdo de la figura 4), con los puntos de polaridad correspondientes para su conexión.



Figura 4. Configuración física del transformador monofásico.

En las siguientes figuras podemos ver algunas configuraciones que se pueden realizar con el *Transformador Defasador*, el cual puede estar conectado en: *delta con alimentación central* (figura 5), *delta con alimentación lateral* (figura 6), *estrella con alimentación lateral* (figura 7), *estrella con alimentación central* (figura 8), y *delta-hexagonal* (figura 9):

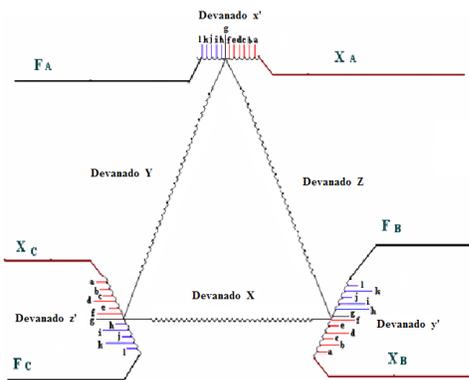


Figura 5. Circuito del Transformador Defasador conectado en Delta con alimentación central.

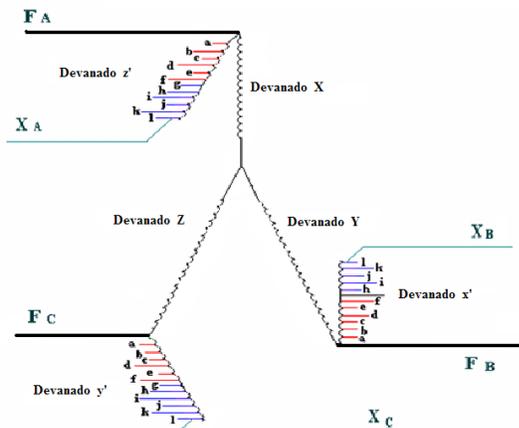


Figura 6. Circuito del Transformador Defasador conectado en Delta con alimentación lateral

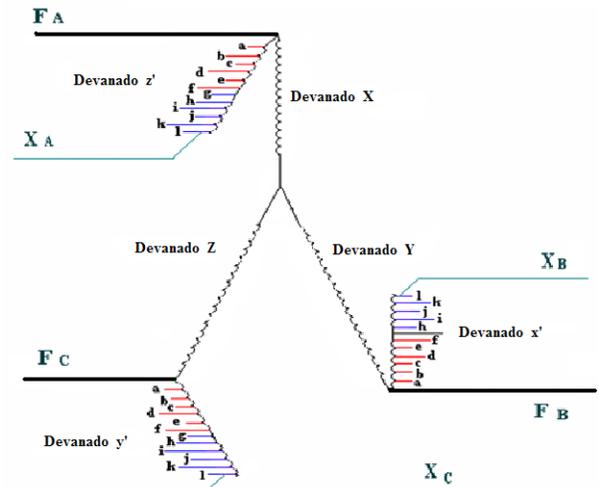


Figura 7. Circuito del Transformador Defasador conectado en Estrella con alimentación lateral.

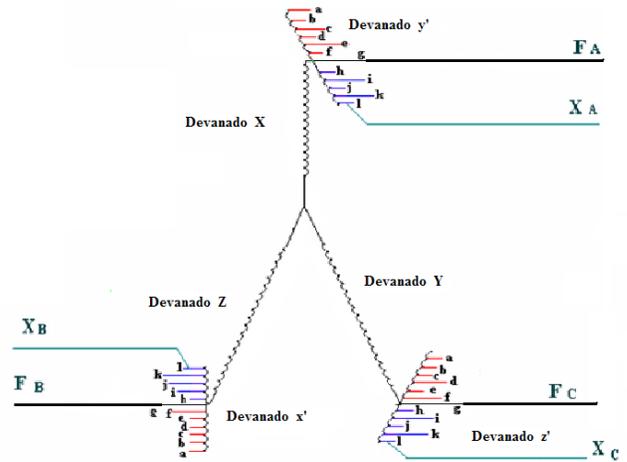


Figura 8. Circuito del Transformador Defasador conectado en Estrella con alimentación central.

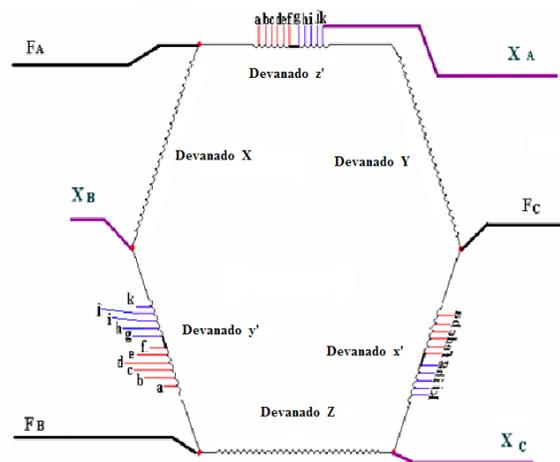


Figura 9. Circuito del Transformador Defasador conectado en Delta-Hexagonal.

### Diagrama de conexiones del proyecto

En la figura 9 se representan las conexiones del *Transformador Defasador* que se hicieron para el desarrollo del proyecto. En base al diagrama de conexiones mostrado en la figura 10, se muestra el diagrama de conexiones de los diferentes dispositivos que se emplearon en el proyecto.

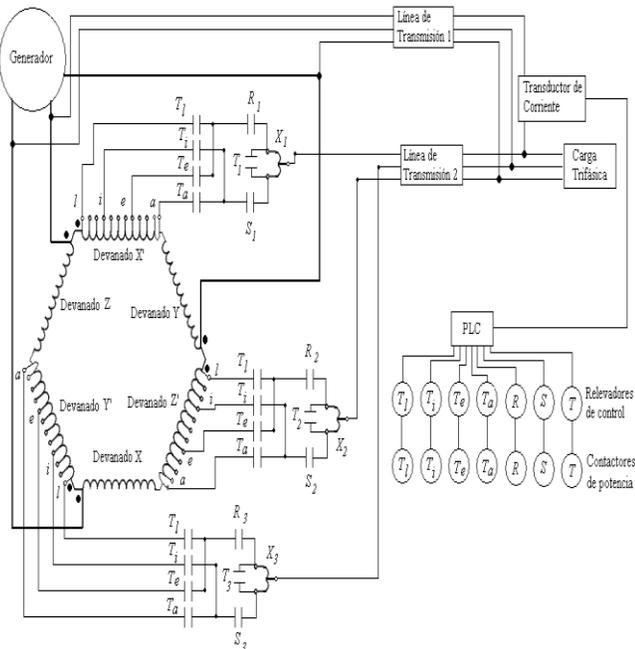


Figura 10. Diagrama de conexiones del proyecto

Las especificaciones para la operación de este transformador monofásico son las siguientes:

- Tensión de alimentación en el primario de 220 VCA
- Potencia monofásica nominal de 2.5 KVA (Kilo-Volt-Ampere)
- Frecuencia a 60 Hz
- 12 terminales en el secundario para el cambio de taps (del Tap a a l)

Se utilizaron tres transformadores monofásicos de este tipo, para formar un sistema trifásico, los cuales proporcionan una potencia trifásica nominal de 7.5 KVA, conectados en **Delta - Hexagonal**.

El circuito equivalente de la conexión **Delta - Hexagonal** se puede observar en la figura 11.  $F_A$ ,  $F_B$  y  $F_C$  son las entradas de las fases de alimentación y  $X_A$ ,  $X_B$  y  $X_C$  son las terminales de salida de los diferentes taps que se conectan directo a los contactores de potencia. Se emplearon solo cuatro taps, debido a la limitación que se tiene en las salidas digitales del PLC; estos taps son a, e, i, l.

En la tabla 1 se tienen los valores de ángulo que proporciona cada tap a utilizar en la conexión **Delta - Hexagonal**.

Tabla 1. Valores de ángulo de los taps a emplear.

Tap	Ángulo
a	14° en atraso
e	10° en atraso
i	4° en atraso
l	0° en atraso

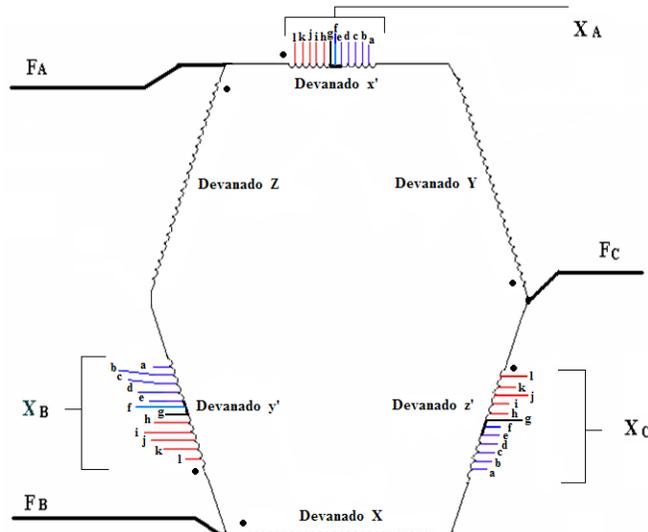


Figura 11. Circuito equivalente del sistema trifásico conectado en Delta - Hexagonal.

En la figura 12, se muestra la configuración física de esta conexión.

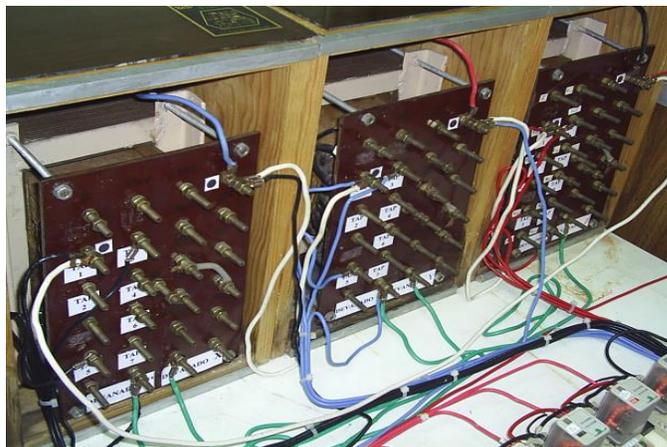


Figura 12. Configuración física del sistema trifásico conectado en Delta - Hexagonal.

### Descripción del Controlador Lógico Programable

Para realizar la función de control de las derivaciones del *Transformador Defasador*, se utilizó un controlador programable de la familia SIMATIC S5, que ofrece soluciones económicas a funciones computacionales complejas y a tareas de control simples. En la figura 13 se observa el PLC empleado. El cual para su operación se utilizó el módulo de suministro de potencia (PS 930), la unidad de procesamiento central (CPU-102), un módulo de entrada analógica con 4 canales, un módulo de salida digital con siete canales y un módulo simulador con siete canales.

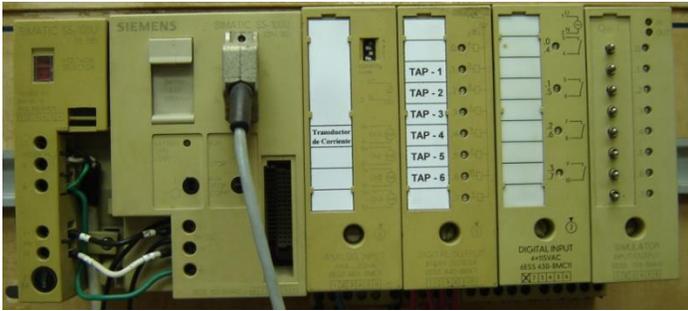


Figura 13. Controlador lógico programable.

Las características de este PLC son las siguientes

- Marca SIEMENS
- Familia SIMATIC S5-100U (Fuente, CPU 102, Cable de comunicación)
- Lenguaje de programación STEP 5
- Tipo Modular, Ligero y Robusto
- Módulos de entradas y salidas Analógicas y Digitales
- Módulo Simulador
- Alimentación de entrada de 115/230 VCA

#### Relevadores de Control

Son los dispositivos electromecánicos que permitieron aislar la etapa de control con la etapa de potencia. Estos elementos están controlados por el PLC y a su vez controlan a los contactores de potencia para el cambio de derivaciones requerido. Se encuentran ubicados sobre su base de once pines, de los cuales solo se ocupan dos contactos normalmente abiertos (NA) y las terminales para energizar la bobina de operación. La figura 14 muestra este elemento.



Figura 14. Relevador electromecánico empleado.

#### Contactores de Potencia

Son los elementos de potencia electromecánicos, que se conectan a los taps del transformador defasador y los que hacen la transferencia de carga en el cambio de taps. Estos elementos están controlados por los relevadores de control y conectados a través de la bobina preventiva o de protección para el cortocircuito. Para nuestro proyecto solo se dispusieron de siete contactores, de los cuales cuatro se conectan a los diferentes taps y tres realizan la transición o transferencia de carga en el cambio de taps. Se encuentran ubicados sobre una un riel din para su fijación. En la figura 15 se observa este dispositivo.

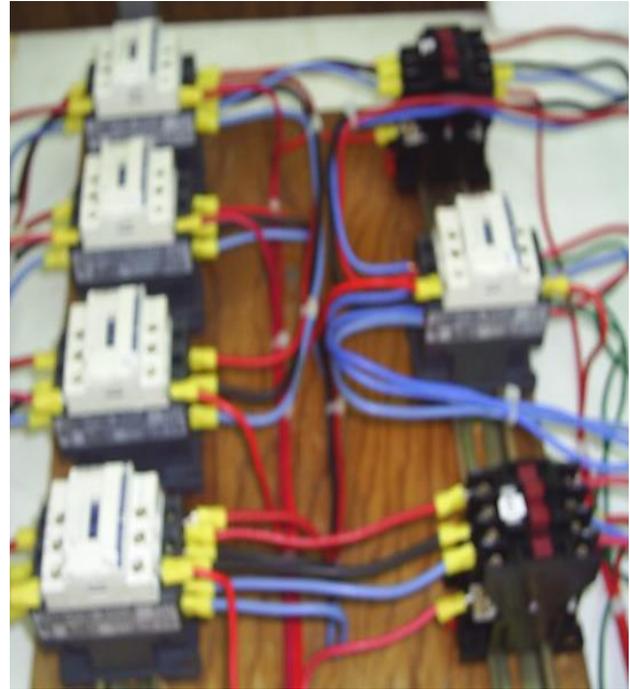


Figura 15. Contactor electromecánico utilizado.

#### Operación de los Taps

Para hacer un cambio de una derivación a otra, se necesita realizar una secuencia de operaciones para evitar un cortocircuito directo en los contactores de potencia. Esta secuencia se operó con un tiempo de 20 milisegundos entre posiciones para la transferencia de carga. En la tabla 2 se observa la secuencia en forma ascendente y en la tabla 3 en forma descendente.

Tabla 5.2. Secuencia de operación de cuatro taps en forma ascendente.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TAP l	0	0	0										
TAP i			0	0	0	0	0						
TAP e							0	0	0	0	0		
TAP a											0	0	0
Contactor R	0	0	0				0	0	0	0			
Contactor S			0	0	0	0					0	0	0
Contactor T	0				0				0				0

**Tabla 5.2.** Secuencia de operación de cuatro taps en forma descendente.

Posición	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TAP a	0	0	0										
TAP e			0	0	0	0	0						
TAP i							0	0	0	0	0		
TAP l											0	0	0
Contacto r R			0	0	0	0	0				0	0	0
Contacto r S	0	0	0				0	0	0	0			
Contacto r T	0				0				0				0

El algoritmo de control está basado en la lógica difusa, es decir, en un conjunto de reglas las cuales estarán en la memoria del PLC representadas por un diagrama de escalera. El control difuso posible más simple puede tener solamente una variable de entrada y una variable de salida.

El algoritmo de control está basado en la lógica difusa, es decir, en un conjunto de reglas las cuales estarán en la memoria del PLC representadas por un diagrama de escalera. El control difuso posible más simple puede tener solamente una variable de entrada y una variable de salida.

### 3. Conclusiones

Debido al crecimiento de la red eléctrica se hace necesario aumentar la conexión de la red eléctrica nacional, pero al hacerlo se presenta la situación de que existen dos subsistemas de transmisión de energía eléctrica: a 220 KV y a 400 KV, presentándose la situación de que en algunas ocasiones, se tienen conexiones entre dos puntos con Líneas de Transmisión tanto a 220 KV, como a 400 KV entre dichos puntos de conexiones. Lo que da lugar que en algunas ocasiones el flujo de potencia se sobrecargue una Línea de Transmisión, y la otra quede descargada, presentándose la necesidad de redirigir los flujos de potencia, esto se puede resolver conectando un Transformador Defasador, en alguna de las Líneas para redirigir el flujo de potencia, tal y como se muestra en la figura 1. Por lo que se ha desarrollado un Transformador Defasador, para realizar investigación en esta Institución Educativa.

### 4. Referencias

- [1] Kramer, J. Ruff, Transformers for phase angle regulation considering to selection of on-load tap-charge, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, No. 12, April 1998.
- [2] Gross, Charles A., Power System Analysis, John Willey, 1986, pp. 327-330.
- [3] Glover & Sarma, Power Analysis System and Design, PWS KENT publishing company, Boston, 1987.
- [4] Scheel, Myenberger Carlos, “Ingeniería de Sistemas Basados en Conocimientos”, División de Graduados ITESM, 1990.
- [5] del Toro, Vincent, Electric Power Systems, Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- [6] White, Davis A & Sogge, Donald A., Handbook of Intelligent Control, Van Nostrand Reinhold, N. Y., 93 p., 1992

## 5. Biografías



### M. I. Alberto de León de León.

Ingeniero Electricista egresado del Instituto Tecnológico de Cd. Madero de 1965 a 1969, con grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey en 1980. Actualmente es

profesor de la carrera de Ingeniería Eléctrica, en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, del Instituto Tecnológico de Madero, dependiente del Tecnológico Nacional de México. Ha recibido la distinción presea al Mérito Académico Adolfo López Mateos, en 1994.

### M. C. Héctor A. Ruíz Ayala,

Ingeniero Electricista egresado del Instituto Tecnológico de Cd. Madero, con grado de Maestría en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico y de Ciudad Madero. Actualmente es profesor de la carrera de Ingeniería Eléctrica, en el Departamento de Ingeniería Eléctrica, del Instituto Tecnológico de Madero, dependiente del Tecnológico Nacional de México.

# DEMAND RESPONSE PROGRAMS FOR IMPLEMENTATION IN PyMES

G. Sandoval<sup>1,a</sup>, Y. Jimenez<sup>2,b</sup>, S. Castro<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Francisco de Paula Santander, Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía,

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica

<sup>3</sup> Universidad Francisco de Paula Santander, Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones

<sup>a</sup> gloriaesmeraldasm@ufps.edu.co, <sup>b</sup> yulieth.jimenez@correo.uis.edu.co, <sup>c</sup> sergio.castroc@ufps.edu.co

**Abstract**—Globally, electrical systems are going through a transition stage where the incorporation of elements of distributed generation added to the needs of the end users, make it necessary to implement a response to active demand. This paper presents a bibliographic review and an analysis about demand response programs as a driving agent of Smart Grids, basic concepts, involved technologies and challenges for their development and presents a business model proposal for its implementation in the sector Colombian electric

*Key words: Demand, Energy, Measurement, Smart Grids*

## 1. Introducción

La demanda energética a nivel mundial ha registrado un crecimiento importante en los últimos años, debido a los cambios en la estructura socioeconómica, el desarrollo industrial y el crecimiento demográfico de las regiones. Esto ha llevado a un crecimiento gradual del sistema energético. Sin embargo, este sistema tiene grietas visibles en sus tres pilares básicos: asequibilidad, sostenibilidad y confiabilidad [1]. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA), la población mundial pasará de 7.1 billones en 2016 a 9.1 billones en 2040, y el mayor crecimiento se daría en las zonas urbanas de las economías en desarrollo. Por otra parte, la incorporación de fuentes de generación de energía renovable ha venido aumentando, lo que representa un aumento de cargas en el sistema generando un desequilibrio entre producción y demanda, la infraestructura está definida por sistemas de generación concentrada y flujos de energía en un solo sentido y tradicionalmente las inversiones están enfocadas a satisfacer la demanda [2]. De este modo, surge la necesidad de implementar mecanismos que permitan la participación activa del consumidor con base en las necesidades del sistema.

En la actualidad los sistemas de energía eléctrica a nivel mundial están experimentando un proceso de transición energética en el que se observa un conjunto de cambios conducidos por la intersección de varias tendencias, la incorporación de fuentes de energía renovables descentralizadas y energía de almacenamiento, y una energía más activa y sensible al precio para los consumidores; el crecimiento de las tecnologías de información y comunicaciones (TIC) que permiten a la energía ser un producto, transmitido y consumido de manera más inteligente y eficiente; el incremento de fuentes de energía renovables,

variables como la energía eólica y solar; la descarbonización de la energía, como parte de los esfuerzos globales de mitigación del cambio climático; y la mayor interconexión de la electricidad con otra infraestructura crítica, como las comunicaciones y transporte lo que realza la importancia de la electricidad en las economías modernas, en este escenario los modelos tradicionales no tienen cabida y se hace necesario una mejora en la infraestructura. [3]

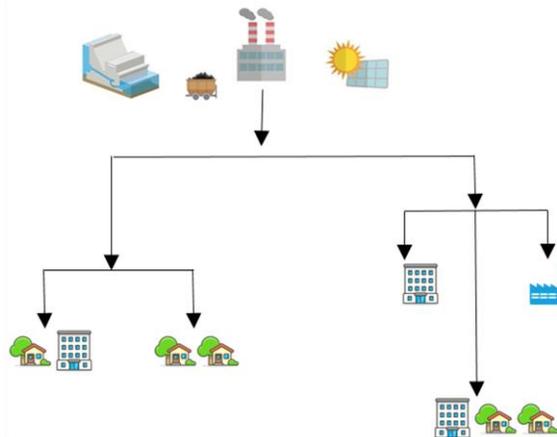


Fig 1. Estructura tradicional de redes eléctricas

En este trabajo se analizan los programas de respuesta a la demanda enfocados en la pequeña y mediana empresa (Pyme), en la sección 2 se presentan conceptos básicos, escenarios tecnológicos en los que se desarrolla y estrategias para su implementación., en la sección 3 se realiza un análisis de mecanismos de respuesta a la demanda y se propone un modelo negocio bajo la metodología CANVAS destacando recursos claves para desarrollo.

## 2. Programas de Respuesta a la Demanda

En el contexto energético actual las empresas distribuidoras de energía se enfrentan a un gran desafío, garantizar un servicio de energía seguro y confiable que satisfaga las necesidades de la creciente demanda, en este sentido las empresas deben fortalecer la participación de los usuarios finales en los

procesos de optimización del sistema, buscando a través de programas incentivos que el usuario final haga un uso adecuado de la energía y de este modo se alivie la carga del sistema en horas pico.

La respuesta a la demanda (DR, del inglés *Demand Response*), se define como el cambio en los perfiles de consumo por parte de los consumidores finales en respuesta a las variaciones del precio de energía eléctrica en el tiempo, de igual modo la DR se puede definir como el pago de incentivos que inducen a un menor consumo de electricidad en horas de consumo pico donde el precio es mayor, o ante contingencias que afectan la fiabilidad del sistema [4]. Estos cambios están diseñados para ser aplicados de tal modo que se pueda aliviar la red en momentos de sobrecarga. Un enfoque más avanzado de la respuesta a la demanda incorpora el uso de tecnologías de medición y comunicaciones, dando beneficios operacionales a la red de distribución y facilitando la interoperabilidad entre el usuario final y el operador de red (OR). [5].

En las economías en desarrollo los usuarios industriales conformados principalmente por pequeña y mediana empresa (PYME), son uno de los principales consumidores de energía. De hecho, según el balance energético colombiano (BECO) en el año 2015 los usuarios industriales consumieron el 26,39% de la energía en Colombia, en este sentido es pertinente el estudio de programas de respuesta a la demanda orientados las PyMEs ya que ofrece un abanico de posibilidades que podrían beneficiar el sector eléctrico, fomentando el crecimiento sostenible del mismo y la participación activa de los usuarios finales [6].

### A. Mecanismos de Respuesta a la Demanda

Los mecanismos de respuesta a la demanda se categorizan en tres grupos, como se observa en la figura 2: mecanismos basados en tiempo, mecanismos basados en incentivos y programas de confiabilidad [7] [8].

i) Mecanismos basados en tiempo (*time-based mechanism*)  
 En estos modelos se establecen precios de la energía en franjas horarias. Dentro de este mecanismo están: a) precio de energía en tiempo real o RTP (por sus siglas en inglés - *Real Time Pricing*), se establecen precios de energía por hora, b) tiempo de uso, o TOU (por sus siglas en inglés - *Time of Use*), que establece tarifas de energía para dos o más bloques de tiempo, generalmente en horas pico y horas valle, c) precio de pico crítico o CPP (por sus siglas en inglés - *Critical Peak Pricing*), este modelo se basa en los dos anteriores y se caracteriza porque se define un precio de pico muy elevado para situaciones críticas del sistema.



Fig 2. Mecanismos de Respuesta a la demanda

ii) Mecanismos de incentivos, en este mecanismo el OR, tiene la capacidad de realizar un control remoto directo sobre parte de la carga de un cliente, ante necesidades del suministro o económicas, esto a cambio de la participación del cliente en un programa de incentivos pactados previamente. Entre estos están: a) Control Directo de Carga o DLC (por sus siglas en inglés - *Direct Load Control*) b) Programa Respuesta de la Demanda por Emergencia o EDRP (por sus siglas en inglés - *Emergency Demand Response Program*).

iii) Programas de Confiabilidad, estos mecanismos están destinados a proveer reservas del lado de la demanda afrontando contingencias que se presenten por déficit de generación.

### B. Beneficios de los Programas de Respuesta.

Tradicionalmente para los usuarios residenciales, comerciales y pequeñas industrias, se establecen tarifas planas y constantes las cuales son un promedio temporal de los precios horarios en el mercado mayorista. [7].

Esta exposición de los usuarios a precios fijos no permite ver los incentivos por ahorro de energía eléctrica en horas pico donde el costo es mayor, en este escenario el objetivo de los programas de respuesta a la demanda mejorar el rendimiento del mercado lo que trae beneficios a los participantes, quienes verán una retribución económica por el ahorro energético y los incentivos recibidos, también se mejora la confiabilidad y seguridad del sistema que operará de forma holgada ante condiciones de máxima demanda, reduciendo en el usuario la exposición a cortes involuntarios por sobrecarga. [9].

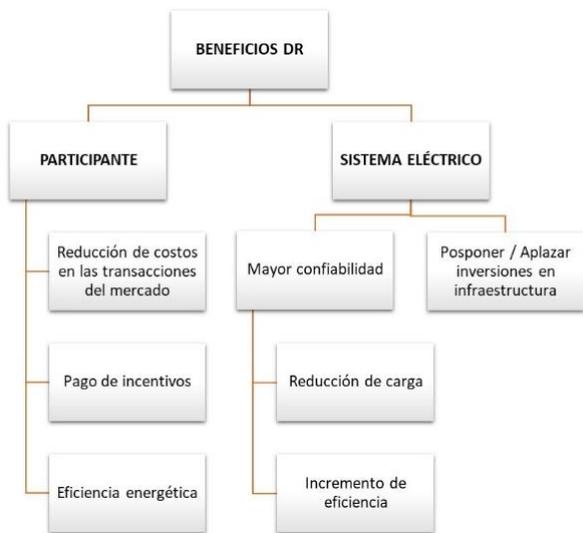


Fig 3. Beneficios programas respuesta a la demanda

Por otra parte, existen beneficios de DR que se concentran en la dinámica de los mercados, favoreciendo la implementación de nuevos servicios secundarios donde la demanda es un actor fundamental, promoviendo acciones de uso eficiente de la energía e infraestructura disponible, lo que lleva a la mejora del desempeño del sistema eléctrico, reduciendo pérdidas y costos de inversión en infraestructura.

### C. Smart Grids y la Respuesta a la Demanda

El sector eléctrico se caracteriza por el crecimiento sostenido, y una infraestructura de generación centralizada, siendo la respuesta a la demanda una oportunidad de liberar carga a la red en horas pico, los últimos años se han caracterizado por la incorporación de elementos de generación distribuida lo que puede mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema, sin embargo esto requiere una transformación en la infraestructura de las redes eléctricas de modo que sean más activas, eficaces y resistentes al crecimiento de la demanda de los consumidores finales, integrando elementos de generación de energías renovables no convencionales y gestión de la respuesta a demanda.

Las Smart Grids involucran tecnologías con un gran potencial para la integración de los sistemas energéticos con las tecnologías de información y comunicaciones permitiendo de este modo medir y monitorizar la calidad del suministro de energía y mejorar el funcionamiento de las redes eléctricas, a partir de la interoperabilidad del proveedor del servicio con los usuarios finales, ajustando los patrones de producción de energía a los hábitos de consumo [10]. Algunas de las ventajas que pueden aportar las Smart Grids al sector eléctrico son: Escalabilidad, Confiabilidad, Seguridad energética, sustentabilidad y competitividad.

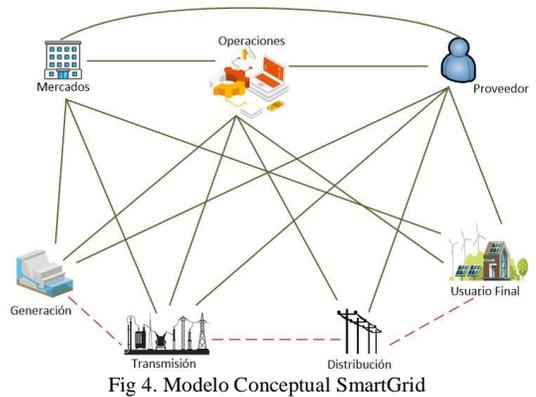


Fig 4. Modelo Conceptual SmartGrid

### D. Infraestructura de Medición Avanzada (AMI)

La infraestructura de Medición Avanzada es uno de los componentes más significativos en la red inteligente que recopila datos de medidores inteligentes y envía los datos recopilados al centro de control para ser analizados y almacenados [11], este sistema es solución integral que tiene la capacidad de gestionar información en tiempo real, facilitando la interoperabilidad entre el usuario final y el operador de red.

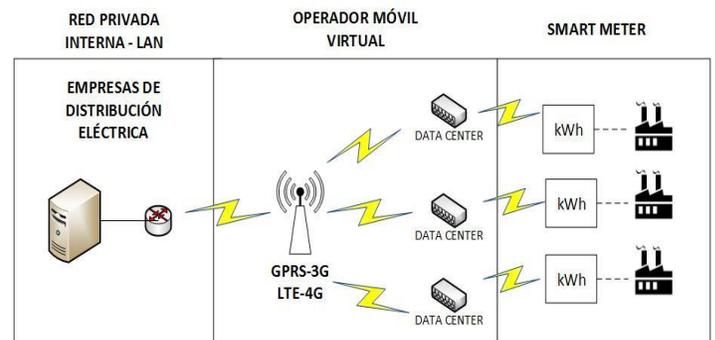


Fig 5. Infraestructura de Medición Avanzada – AMI

El sistema AMI en general se compone de tres módulos principales [10] [12]:

- Medidores inteligentes: Son equipos electrónicos de medición avanzada que tienen la capacidad de realizar conexión y desconexión de servicios a distancia al tiempo que registran valores de tensión y corriente y vigilan los parámetros de calidad de energía.
- Redes de comunicaciones: La infraestructura del sistema de comunicación debe ser bidireccional, lo que permite la transmisión de un gran volumen de datos entre el equipo de medida y el sistema de gestión.
- El sistema de gestión de datos de medición (MDMS): es el encargado de procesar la información con el objeto de monitorizar la calidad del servicio.

La infraestructura de las TIC de la red inteligente debe permitir a los operadores de red interactuar con sus dispositivos eléctricos y con los clientes casi en tiempo real. Sin embargo, para cualquier tecnología inalámbrica, existen varios desafíos que aún deben abordarse antes de su implementación algunos de los estos desafíos son: [13]

a) Cobertura: Algunas aplicaciones de redes inteligentes, como los sistemas SCADA y AMI requieren que la red de acceso cubra un área grande. Sin embargo, dado que el nivel de interferencia aumenta a medida que aumenta el número de nodos, la cobertura de una red inalámbrica tiene una relación inversa con la capacidad del canal. En este sentido, la transmisión por transmisión es una técnica importante para ampliar la cobertura y mejorar la capacidad.

b) Confiabilidad: La confiabilidad de red se define en términos de la robustez, las aplicaciones de redes inteligentes como las AMI requieren rutas de comunicación que sean confiables de modo que las propagaciones de la radio en las comunicaciones inalámbricas no se vean afectadas.

### 3. Análisis de Mecanismos de Respuesta a la Demanda y Condiciones de Operación

Para llevar a cabo los programas DR, los consumidores deben aceptar de manera voluntaria una reducción en la calidad del suministro de energía eléctrica, a cambio de un beneficio, la tabla 1 detalla los factores que motivan a los operadores de red y consumidores finales a participar en estos programas.

Factor Motivador	Operador de Red	Usuario Residencial	Usuario Industrial
Necesidad de recursos	++		
Programas de incentivos por uso eficiente de la energía		++	++
Confiabilidad del sistema y calidad del servicio	++	+	++
Reducción de costos de inversión en infraestructura	++		

Tabla 1 Factores que motivan la implementación de programas de DR

Los mecanismos de respuesta a la demanda descritos en la sección 1 A son aplicables dependiendo del tipo de cliente, por ejemplo, los mecanismos basados en incentivos y los programas de confiabilidad no son recomendables para usuarios industriales esto debido a la posibilidad que tiene el

operador de red de ejercer control remoto sobre la carga del usuario afectando su productividad, por otro lado los mecanismos basados en tiempos donde se establece una tarifa en tiempo real, ofrece al usuario final la posibilidad de acceder a beneficios por desplazar sus consumos en periodos de máxima demanda a periodos de baja demanda, o llevar a cabo programas de eficiencia energética.

Los programas basados en tiempos requieren una frecuencia en la medición y tarifado relativamente alta, para esto es necesario una infraestructura de medición avanzada que posibilite el registro de la energía consumida y la potencia en un momento determinado, entregando de este modo un registro diario y horario [7]. Los costos de inversión de estos programas son altos dependiendo de la cantidad de usuarios a atender por lo que es importante para el operador de red establecer los objetivos del plan y la frecuencia de la medición, en este contexto se propone una estrategia DR que esté orientada a la implementación de medidas que permitan modificar el perfil de consumos de los usuarios finales, evaluando el impacto de estos programas en el sistema en el sistema eléctrico, como se muestra en el mapa de procesos de la figura 6.



Fig 6. Mapa de Procesos DR

Los sectores productivos en las economías de desarrollo son un actor importante en la matriz de consumos energéticos, el sector productivo colombiano está conformado principalmente por pequeña y mediana industria esto los hace clientes potenciales a la hora de implementar programas de respuesta a la demanda, en este escenario se debe establecer de manera clara las bases del modelo del programa a implementar para lograr los objetivos propuestos sin caer en sobrecostos.

Los programas de DR se cimientan en la articulación de actores clave en el mercado eléctrico tales como comercializadores, consumidores y operadores del sistema, los cuales no solo perciben beneficios, si no que hacen parte de la cadena de valor permitiendo el cumplimiento de las metas fijadas y dinamizando el mercado de servicios energéticos.

La tabla 2 presenta un modelo de negocio por metodología CANVAS, para la implementación de un programa de respuesta a la demanda, esta metodología es una propuesta que detalla como una entidad, empresa u organización genera y da valor, esta propuesta está compuesta por 9 elementos; estos elementos son: los clientes, la propuesta de valor, los canales de distribución, las relaciones con los clientes, la fuente de ingresos, los recursos clave, las actividades clave, las alianzas o socios clave y la estructura de costos.

Asociación es clave.	Actividades Clave	Propuesta de Valor	Relaciones con clientes	Segmento de Clientes
Proveedores de servicios de comunicaciones.	Gestión de Consumos en tiempo real	Programa de respuesta a la demanda energética, para la mejora de la confiabilidad del sistema eléctrico en zonas urbanas	Planes de incentivos	Grupos empresariales
Alianzas con comercializadores de energía	Servicio al cliente		Interacción virtual	Pymes
	<b>Recursos clave</b> Técnicas de análisis de datos.		Interoperabilidad	Clústeres industriales
	Infraestructura TIC.		Respuesta a solicitudes	
	Sistemas AMI		<b>Canales</b>	
			Página Web	
			Aplicativo móvil	
			Boletines de divulgación	
			Contacto directo clientes	
<b>Estructura de Costos</b>		<b>Fuentes de Ingresos</b>		
Inversión en infraestructura de medición.		Ahorro en programas de expansión de redes de distribución.		
Inversión en TIC.		Ahorro en programas de mantenimiento preventivo y correctivo en redes de distribución		
Gastos de administración		Reducción de pérdidas de energía		
Gastos de operación				

Tabla 2. Modelo de negocio programa de respuesta a la demanda Metodología CANVAS

La metodología CANVAS permite identificar la relación entre los actores del programa, así como los requerimientos técnicos y tecnológicos que permitan el cumplimiento de los objetivos trazados, en este sentido el éxito de los programas DR está en el desarrollo de políticas de incentivos y adecuación de la infraestructura de medición y comunicaciones que faciliten la interacción flexible y segura entre los consumidores y agentes del sistema facilitando el control de la demanda.

#### 4. Conclusiones

Los programas de respuesta a la demanda son una alternativa para el sector industrial que favorece un equilibrio en la relación oferta demanda en las redes de distribución al tiempo que se reducen los costos de electricidad, además ayuda a liberar cargas del sistema aumentando su confiabilidad a la vez

que contribuyen con la reducción de emisiones contaminantes en la generación.

Los programas de respuesta a la demanda son un agente impulsor de las Smart Grids y desarrollo de automatización y comunicaciones, sin embargo, estos programas tienen el reto de garantizar la confiabilidad y seguridad del sistema, interoperabilidad entre usuario y operador de red y la seguridad informática y privacidad de datos.

Es necesario el desarrollo de mecanismos que propicien una gestión dinámica de los consumos y además promueva la eficiencia energética en sectores industriales acercando a los consumidores finales a beneficios y programas de incentivos.

#### 5. Referencias

- [1] Observatorio Colombiano de Energía: Aproximación a Las Condiciones Para su Conformación. Universidad Nacional de Colombia, Unidad de Planeación Minero Energética – UPME –, Universidad del Valle, Centro del Desarrollo Tecnológico de Gas., Julio 2018.
- [2] Espinosa R, Alfredo, Gonzalez C, Salvador and Sierra R, Benjamin “Automatización de la Distribución: Presente y Futuro,” *Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Mexico, boletín 02 2011, pp 47-55*
- [3] Ignacio J. Pérez-Arriaga, Jesse D. Jenkins, and Carlos Batlle, 2017. "A regulatory framework for an evolving electricity sector: Highlights of the MIT utility of the future study," *Economics of Energy & Environmental Policy, International Association for Energy Economics*, vol. 0(Number 1).
- [4] Cappers, P., Goldman, C. y Kath, D. (2010). Demand response in U.S. electricity markets: Empirical Evidence. *Energy*, 35(4), 1526-1535. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.029>
- [5] M.H. Albadi, E.F. El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, Issue 11., pp1989-1996 Nov. 2008.
- [6] Gómez J, Carvajal S, Arango A, Demand Response Programs For Residential Sector in Colombia: SystemsThinking Approach. *Energética* 46, diciembre (2015), pp. 73-83. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. ISSN 2357 - 612X (en línea)
- [7] Del Rosso, Alberto and Ghia Andres. “Análisis de Respuesta de la Demanda para Mejorar la Eficiencia de Sistemas Eléctricos” 1ed. Buenos Aires 48p. 2010
- [8] Gomez M, Hector, Vallejo B, Carlos “Análisis de Mecanismos para la Aplicación de Programas de Respuesta de la Demanda en el Mercado Eléctrico Colombiano”. Trabajo de grado Magister en Administración Financiera. Universidad EAFIT, Escuela de Economía y Finanzas. 2016
- [9] Marulanda G, Alberto. “Impacto de un Programa de Respuesta a la Demanda Eléctrica en el Sector del Gas Natural”. Universidad Tecnológica de Pereira, 72p. 2014
- [10] Benites R, Yennifer “Metodología de diseño conceptual de la automatización de red de distribución de energía que permita la integración de recursos energéticos distribuidos (DER) e implementación de estrategias de gestión de demanda (DSM)” Trabajo de grado Magister en Ingeniería Eléctrica. Universidad Nacional de Colombia. 2017.
- [11] A. Ghasempour and T. K. Moon, "Optimizing the Number of Collectors in Machine-to-Machine Advanced Metering Infrastructure Architecture for Internet of Things-Based Smart Grid," *2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Kansas City, MO, 2016, pp. 51-55. doi: 10.1109/GreenTech.2016.17 .

- [12] J. M. Gómez Lopez, R. Castán Luna, J. C. Montero Cervantes, J. Meneses Ruiz, and J. Garcia Hernandez, "Deployment of Advanced Metering Infrastructure (AMI) for power distribution losses reduction," *Bol. IIE*, vol. 39, no. 4, pp. 180–191, 2015
- [13] H. Sun, A. Nallanathan, B. Tan, J. S. Thompson, J. Jiang and H. V. Poor, "Relaying technologies for smart grid communications," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 6, pp. 52-59, December 2012. doi: 10.1109/MWC.2012.6393518

## 6. Biografías

Gloria Esmeralda Sandoval Martínez , ingeniería Electromecánica de la Universidad Francisco de Paula Santander, especialista en Gerencia de Recursos Energéticos de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, Magíster Candidato en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica en la Universidad Industrial de Santander, doce años de experiencia en el sector eléctrico, consultora de proyectos energéticos en el departamento Norte de Santander, Docente ocasional tiempo completo en la Universidad Francisco de Paula Santander adscrita al Departamento de Electricidad y Electrónica, Directora del Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía. Sus intereses de investigación son: sistemas de gestión energética, redes eléctricas inteligentes (Smarts Grids) y energías renovables.

Yulieth Jiménez Manjarrés, Ingeniera electrónica y Doctora en Ingeniería de la Universidad Industrial de Santander. Sus intereses de investigación son: monitorización no intrusiva de carga, gestión energética, inteligencia artificial y procesamiento digital de señales.

Sergio Alexander Castro Casadiego, Ingeniero Electrónico de la Universidad Francisco de Paula Santander, Magíster en Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Experimental del Táchira. Docente Catedrático de la Universidad Francisco de Paula Santander, Investigador Asociado según Colciencias, perteneciente al Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones. Sus intereses de investigación son: la instrumentación electrónica, el procesamiento digital de señales, las soluciones móviles, los sistemas de control moderno, en Internet de las cosas y las redes eléctricas inteligentes.

# Control PWM para la Reducción de Potencia Consumida en Transmisor Inalámbrico Tipo Inductivo.

L. A. Sotres<sup>1,a</sup>, L. Hernández<sup>1,b</sup>, M. Carbajal<sup>1,c</sup>, P. Guevarra<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, SEPI-ESIME Culhuacan

<sup>a</sup> [lhernandezg@ipn.mx](mailto:lhernandezg@ipn.mx), <sup>b</sup> [lasotres@hotmail.com](mailto:lasotres@hotmail.com), <sup>c</sup> [carbajalmarco@gmail.com](mailto:carbajalmarco@gmail.com), <sup>d</sup> [pguevarra@ipn.mx](mailto:pguevarra@ipn.mx)

**Resumen**—En este artículo se plantea el análisis y diseño de un método de control para la reducción de consumo energético cuando un transmisor inalámbrico se encuentra sin acoplamiento a la carga y aumento de potencia transmitida cuando se logra el acoplamiento a la carga. Para generar la transmisión inalámbrica tipo inductiva se utilizó un esquema buck-simétrico con carga resonante tipo paralelo. Basado en el comportamiento de las señales en el circuito resonante se propone la técnica de reducción de consumo en modo reposo a través de las señales PWM en ráfaga. El principio de operación y las características de método propuesto se encuentran descritas a detalle en el desarrollo del artículo, la propuesta de reducción de potencia en modo de reposo, se validó mediante simulaciones y resultados experimentales, obteniéndose datos que reducen el consumo de potencia de 4.9 Watts sin control a 0.28 Watts con control, equivalente a una reducción del 94.2%.

**Palabras clave.** Transferencia Inalámbrica de Energía, Circuito resonante, Consumo Energético, Control PWM.

## 1. Introducción

La recarga inalámbrica ha ido en auge debido al creciente desarrollo y demanda de equipos portátiles, hoy en día existe una gran variedad de equipos que se pueden recargarse inalámbricamente [1], desde implantes médicos [2], celulares [3], hasta vehículos [4], [5] y [6].

La transferencia inalámbrica de energía (*WPT*, *Wireless power transmission*) puede ser dividida en 3 categorías, transferencia de energía por medio inductivo (*IPT*, *Inductive power transmission*) [7], [8], [9], transferencia de energía por medio capacitivo (*CPT*, *Capacitive power transmission*) [10], [11], [12] y transferencia de energía por medio inductivo-capacitivo o híbrido (*HPT*, *Hybrid power transmission*).

El *CPT* utiliza el campo eléctrico para transmitir energía, este esquema presenta la ventaja de: diseño flexible, bajo volumen y peso en las estructuras transmisoras y receptoras, y la capacidad de penetrar por el metal [13], sin embargo, presenta como desventaja una separación de placas de algunos mm, la potencia de transmisión es muy baja en comparación con la de los sistemas *IPT*, para el *CPT* se han reportado potencias menores a 1kW [14].

El *IPT* utiliza el campo magnético para transmitir energía, este esquema ofrece ventajas como son: capacidad de transmitir altas potencias y con eficiencias de más de 94%

[15], [16], flexibilidad para utilizar diferentes topologías de transmisión y recepción [5], variedad de tipos de control de estas mismas [7], [8], el espacio entre transmisor y receptor [9] es mayor que en un sistema *CPT* [17], [18].

Debido al cambio climático, el consumo energético se ha vuelto un tema trascendente en el ámbito científico, por lo que estudios de energías renovables [19], [20] han surgido para dar solución al desperdicio de energía, generando así sistemas de alta eficiencia [12], [21], otra manera de reducir el consumo energético es realizando un análisis de potencia consumida por un sistema en un día de uso. Analizando el consumo de un cargador inalámbrico de celulares se llega a la conclusión que de 24 horas que se encuentra conectado a la red eléctrica, tan solo de 3 a 5 horas son las que realmente cumple con su función, el resto del día opera en estado de reposo. Por lo anterior es atractivo proponer técnicas de reducción de consumo energético para operación en modo reposo [22] para sistemas de *WPT*.

La estructura de este artículo es la siguiente. En la sección 2, se presenta el circuito eléctrico de transmisión de energía al cual se propondrá la técnica de reducción de consumo. Se describen las características de diseño del prototipo y se hace la propuesta de control para modo en reposo. En la sección 3 se muestran los resultados obtenidos en simulación y experimentales, y finalmente en la sección 4 se presenta un análisis de los principales resultados obtenidos del control propuesto.

## 2. Transmisor inalámbrico tipo inductivo

### A. Circuito eléctrico propuesto

En la Fig. 1, se presenta el circuito eléctrico propuesto para el transmisor inalámbrico inductivo, este está integrado con tres bloques básicos, remarcado en color rojo se indica el convertidor Buck-1, en color azul el convertidor Buck-2, en verde el inversor de medio puente y en gris el circuito resonante paralelo. Para lograr un convertidor compacto para la adecuada generación de la señal sinusoidal, el capacitor de filtrado es compartido por cada Buck y el circuito resonante, la integración de Cout con Ltx permite obtener una señal

sinusoidal con baja distorsión armónica y al mismo tiempo condiciona un bajo nivel de rizo a la salida de cada Buck.

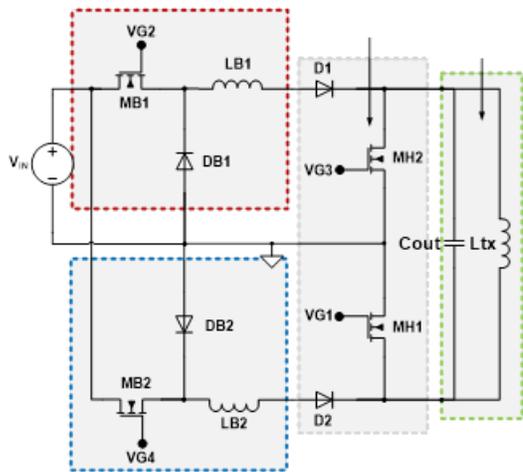


Fig 1. Propuesta de Transmisor Inalámbrico.

La operación del transmisor se basa en el control de 2 señales PWM complementarias y 2 señales PWM tipo Burst, las cuales se muestran en la Fig. 2. La sincronización y el control de las 4 señales (PWM complementarias y PWM-Burst) generan una señal cuadrada bipolar, donde el control de ganancia de cada buck condiciona la amplitud máxima de la señal cuadrada bipolar. La aplicación de la señal cuadrada bipolar a la carga resonante, Cout-Ltx, genera una señal sinusoidal con amplitud pico igual a la amplitud de salida de cada convertidor buck, con baja distorsión armónica, ver Fig. 3.

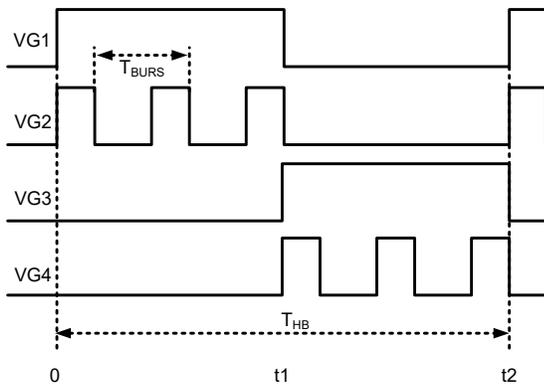


Fig 2. PWM Burst y PWM complementario del medio puente.

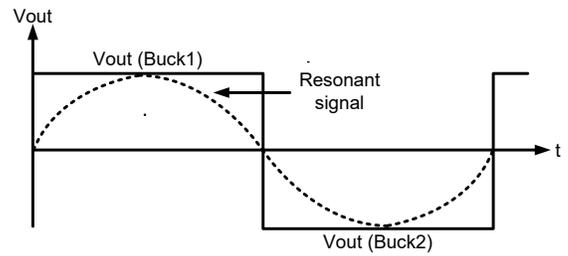


Fig 3. Vout aplicado a circuito resonante y señal sinusoidal obtenida.

Para lograr una correcta operación del transmisor inalámbrico, los periodos de las señales de conmutación de los MOSFET del medio puente (MH1 and MH2) deben ser múltiplos de las señales de los MOSFET de los Buck (MB1 and MB2), ya que se debe de asegurar que todos los pulsos PWM-Burst entren en la ventana de activación de los MOSFET del medio puente.

### B. Diseño del Prototipo

Para comprobar el principio de operación del transmisor, se procedió a diseñar un prototipo a 15Watts de potencia máxima de transmisión. Las especificaciones de diseño se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.

$V_{in}$	30 V
$V_{outpico}$	30 V
$I_{outpico}$	500 mA
$F_{Burst}$	500 KHz
$F_{HB}$	100 KHz
$L_{tx}$	6.3 $\mu$ H
$r_{Lr}$	17m $\Omega$

En la Fig. 4 se muestra el circuito final con valores, el procedimiento de cálculos se puede encontrar a detalle en [23].

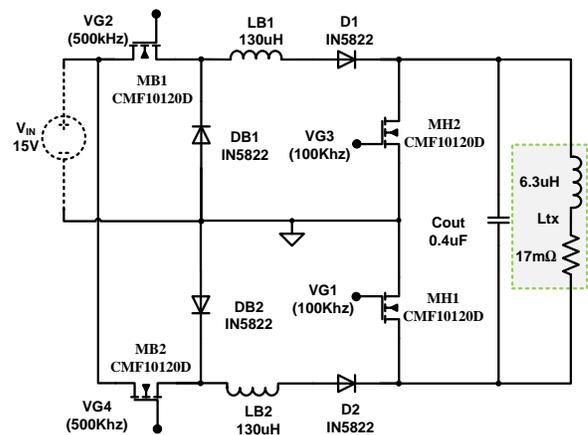


Fig 4. Circuito con valores finales.

### C. Diseño del control para modo reposo.

La base para realizar el diseño del control del transmisor parte a partir de la ecuación de ganancia del convertidor Buck, expresión (1) [4], [5].

$$M = D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

La ecuación (1) puede ser reescrita como se muestra en la expresión (2).

$$V_{out} = D * V_{in} \quad (2)$$

De (2) se deduce que al controlar la ganancia de los convertidores Buck, altera directamente la amplitud pico con la que se energiza al circuito resonante. Al ser un circuito simétrico si se modifican ambos ciclos de trabajo se modifica la amplitud pico a pico de manera simétrica en la senoide obtenida en el circuito resonante [24]. El diseño del control se basa en dos casos:

Caso 1. Cuando el transmisor no se encuentra acoplado a un circuito receptor que genere una carga, el voltaje pico a pico de la senoide obtenida en el circuito resonante está dado por la ganancia del Buck.

Caso 2. Cuando el transmisor se encuentra acoplado a un circuito receptor que energiza una carga, el voltaje pico a pico de la senoide obtenida en el circuito resonante presenta una caída de voltaje.

En base a los dos casos anteriores se diseña el lazo de control para la reducción de potencia consumida en modo reposo (sin carga), mediante la programación de dos modos de operación en el transmisor, las condiciones de diseño son las siguientes: El modo 1 reduce la ganancia en los Buck hasta el punto en el que el transmisor es capaz de transmitir a una distancia máxima de 150mm a muy baja potencia, la condición anterior permitirá detectar cuando un circuito receptor se acople. El modo 2 se activará cuando se detecte que hay un circuito receptor acoplado al transmisor, en este caso la ganancia del Buck aumenta hasta lograr la potencia requerida.

## 3. Resultados

### A. Resultados de simulación.

Para la validación del diseño de control propuesto en el transmisor inductivo, se procedió a obtener resultados de simulación.

En la Fig. 5, se muestran las señales de control de cada Buck con un ciclo de trabajo del 90%, en la Fig. 6 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante, este

representa el caso de operación dos en el cual se desea entregar la máxima potencia a la carga.

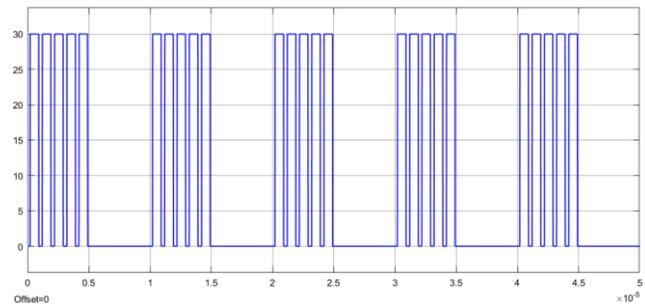


Fig 5. Señal de control Burst con D=90%.

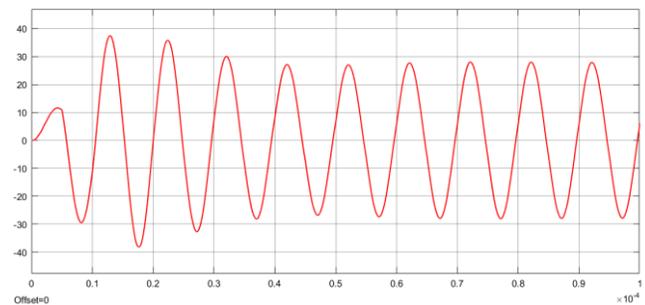


Fig 6. Señal en el circuito resonante con D=90%.

En la Fig. 7, se muestra la señal de control de cada Buck con un ciclo de trabajo del 10%, en la Fig. 8 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante, este representa el caso de operación 1 en el cual se desea transmitir la mínima potencia para el caso sin carga acoplada.

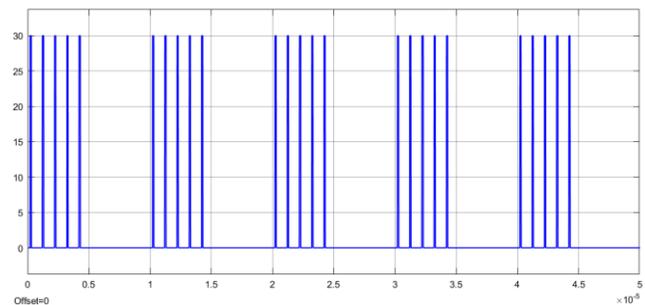


Fig 7. Señal de control Burst con D=10%.

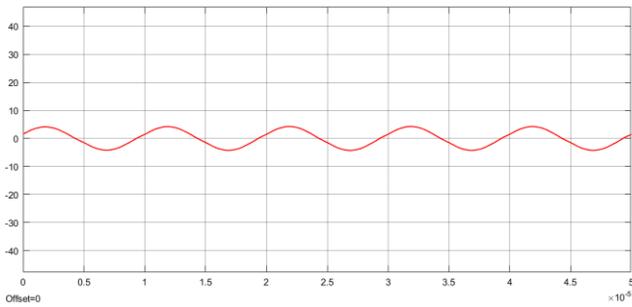


Fig 8. Señal en el circuito resonante con  $D=10\%$ .

### B. Resultados experimentales.

Para la validación experimental se procedió a probar el prototipo experimental con los valores indicados en la Tabla 1.

En la Fig. 9 se muestra la señal de control de MH1 en la parte superior y la señal de control de MB1 en la parte inferior, en la Fig. 10 se representa la señal de control de MH2 en la parte superior y la señal de control de MB2 en la parte inferior. La frecuencia de MB1 y MB2 cumple la condición de ser múltiplo de la frecuencia de control de MH1 y MH2.

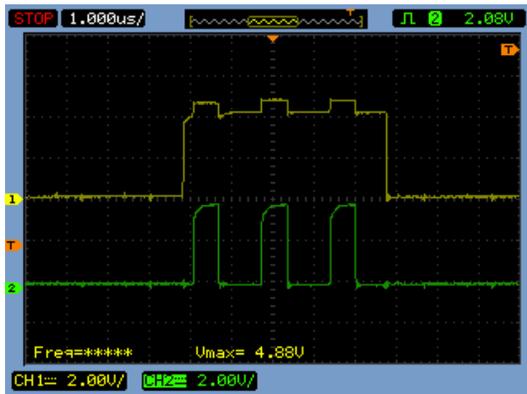


Fig 9. Señales de control de MH1 y MB1.

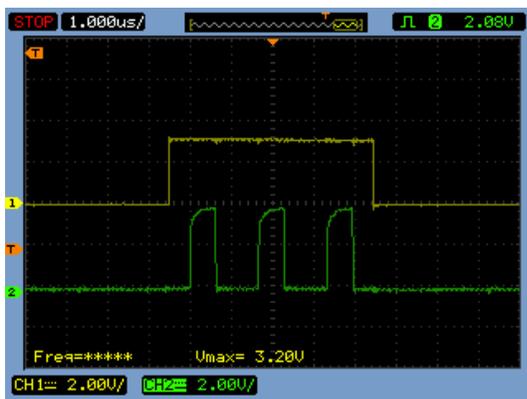


Fig 10. Señales de control de MH2 y MB2.

En la Fig. 11 se observan las señales de control de MH1 y MB1 con un ciclo de trabajo del 30%, estas señales representan cuando el transmisor se encuentra en el caso de operación 1, en el cual se desea utilizar la mínima potencia de transmisión. En la Fig. 12 se muestra la señal de salida obtenida en el circuito resonante.

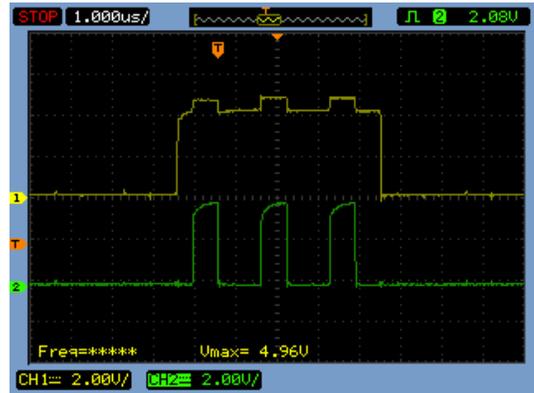


Fig 11. Señales de control para caso de operación 1.

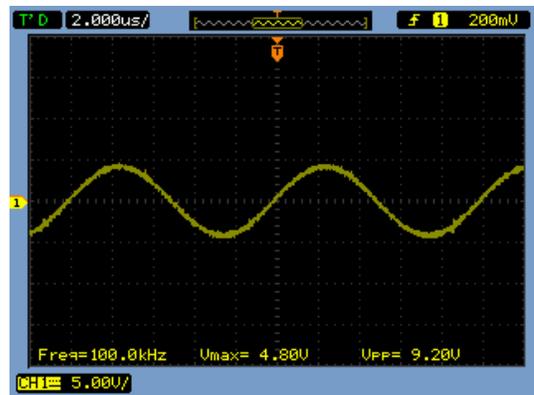


Fig 12. Señal en el circuito resonante con  $D=30\%$ .

En la Fig. 13 se observan las señales de control de MH1 y MB1 con un ciclo de trabajo de 90%, estas señales representan el caso de operación 2, en el cual se desea entregar la máxima potencia a la carga, en la Fig. 14 se encuentra la señal obtenida en el circuito resonante, donde se comprueba el valor teórico indicado en la ecuación (2).

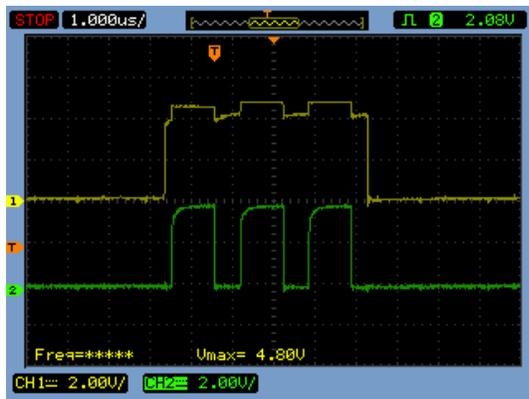


Fig 13. Señales de control para caso de control 2.

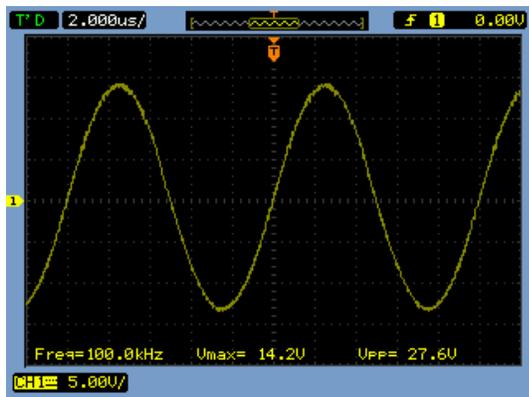


Fig 14. Señal en el circuito resonante con D=90%.

En la Tabla 2, se resumen los principales resultados obtenidos en el desarrollo de la propuesta, de este modo queda validado que el caso de operación 1 reduce la potencia consumida del prototipo y para el caso de operación 2 la potencia es máxima de acuerdo a la carga acoplada.

TABLA 2. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

D	Estado	Receptor Acoplado	Potencia
30%	Caso 1	No	0.28W
30%	Caso 1	Si	0.58W
90%	Caso 2	Si	6.7W
90%	Caso 2	No	4.92W

#### 4. Conclusiones

Se propuso un método de control para la reducción de potencia consumida por un transmisor inalámbrico de tipo inductivo compuesto por un circuito Buck inversor simétrico, basado en el análisis del comportamiento de las señales en el circuito resonante se planearon 2 casos de operación, el primero (modo reposo) en el cual se desea obtener solo la potencia mínima requerida para transmitir a 150mm y lograr sensar si hay un circuito receptor acoplado y el segundo caso

(modo acoplado) en el cual se requiere obtener la potencia máxima para carga inalámbrica. Se validó la propuesta de control mediante simulaciones y un prototipo físico, obteniendo resultados que reducen la potencia de transmisión en un 94.2% con respecto a la potencia de transmisión sin acoplamiento. Más específicamente se redujo de 4.9W a 0.28W.

#### 5. Referencias

- [1] Ahmed A. S. Mohamed, A. A. Marim, and O. A. Mohammed, "Magnetic Design Considerations of Bidirectional Inductive Wireless Power Transfer System for EV Applications," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 53, No. 6, pp. 8700105-8700105, JUNE 2017.
- [2] A. I. Al-Kalbani, M. R. Yuce, and J. Redoute, "A biosafety comparison between capacitive and inductive coupling in biomedical implants," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 13, No. 1, pp. 1168-1171, Jun. 2014.
- [3] Patrick S. Riehl, Anand Satyamoorthy, Hasnain Akram, Yung-Chih Yen, J.-C. Yang, Brian Juan, Chi-Min Lee, Fu-Chi Lin, Vladimir Muratov, William Plumb and Philip F. Tustin, "Wireless Power Systems for Mobile Devices Supporting Inductive and Resonant Operating Modes," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 63, No. 3, pp. 780-790, MARCH 2015.
- [4] C. Park, S. Lee, S. Jeong, G. Cho, and C. T. Rim, "Uniform power ltype inductive power transfer system with DQ-power supply rails for on-line electric vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6446-6455, Nov. 2015.
- [5] John M. Miller, Omer C. Onar and Madhu Chinthavali, "Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, No. 1, pp. 147-162, MARCH 2015.
- [6] Yue Sun, Cheng Jiang, Zihui Wang, Lijuan Xiang and Huan Zhang, "Bi-Directional Wireless Power Transfer for Vehicle-to-Grid Systems," Journal of Power Electronics, Vol. 18, No. 4, pp. 1190-1200, July 2018.
- [7] Xu Liu, Lindsay Clare, Xibo Yuan, Jun Wang, Chonglin Wang and Jianhua Liu, "Constant Output Power Control Methods for Variable-Load Wireless Power Transfer Systems," Journal of Power Electronics, Vol. 18, No. 2, pp. 533-546, March 2018.
- [8] Andreas Berger, Matteo Agostinelli, Sanna Vesti, Jesús A. Oliver, José A. Cobos and Mario Huemer, "A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power," IEEE Transaction on power Electronics, VOL. 30, NO. 11, pp. 6338-6348, NOVEMBER 2015.
- [9] Nomar S. González-Santini, Hulong Zeng, Yaodong Yu, and Fang Zheng Peng, "Z-Source Resonant Converter With Power Factor Correction for Wireless Power Transfer Applications," IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 31, No. 11, pp. 7691-7700, NOVEMBER 2016
- [10] Wei Zhou, Yu-Gang Su, Shi-Yun Xie, Long Chen, Xin Dai and Yu-Ming Zhao, "An Interference Isolation Method for Wireless Power and Signal Parallel Transmissions on CPT Systems," Journal of Power Electronics, Vol. 17, No. 1, pp. 305-313, January 2017.
- [11] D. C. Ludois, M. J. Erickson, and J. K. Reed, "Aerodynamic fluid bearing for translational and rotating capacitors in noncontact

capacitive power transfer systems,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 50, no. 2, pp. 1025–1033, Mar./Apr. 2014.

- [12] J. Dai and D. Ludois, “A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no. 11, pp. 6017–6029, Nov. 2015.
- [13] C. Liu, A. P. Hu, and N. K. C. Nair, “Modelling and analysis of a capacitively coupled contactless power transfer system,” IET Power Electronics, Vol. 4, No. 7, pp. 808-815, Aug. 2011.
- [14] J. Dai and D. C. Ludois, “Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper,” in Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 3307-3313, 2015.
- [15] Fei Lu, Hua Zhang, Heath Hofmann and Chunting Chris Mi, “An Inductive and Capacitive Combined Wireless Power Transfer System With LC-Compensated Topology,” IEEE Transaction on power Electronics, Vol. 31, No. 12, pp. 8471-8482, DECEMBER 2016.
- [16] Junjun Deng, Weihan Li, Trong Duy Nguyen, Siqi Li and Chunting Chris Mi, “Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis,” IEEE Transaction on power Electronics, VOL. 30, NO. 11, pp. 6130-6140, NOVEMBER 2015.
- [17] C. Liu, A. P. Hu, B. Wang, and N. C. Nair, “A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control,” IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 1, pp. 249-260, Jan. 2013.
- [18] Y. Su, S. Xie, A. Hu, C. Tang, and W. Zhou, “Transmission property analysis of electric-field coupled wireless power transfer system with LCL resonant network,” Transactions of China Electrotechnical Society, Vol. 30, No. 19, pp. 55-60, Oct. 2015.
- [19] Byung-Hwan Jeong, Jun-Seok Cho, Jae-Seok Gho, Gyu-Ha Choe, Eung-Sang Kim, and Chang-Sung Lee, “A Study on Photovoltaic/Wind/Diesel Hybrid Power System,” Journal of Power Electronics, vol. 3, no. 1, pp.40-48, 2003.
- [20] Dong-Choon Lee and Ahmed. G. Abo-Khalil, “Optimal Efficiency Control of Induction Generators in Wind Energy Conversion Systems using Support Vector Regression,” JPE, vol. 8, no. 4, pp.345-353, 2008.
- [21] Jeong-Il Kim, Chung-Wook Roh, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn, “A High-Power Step-up Converter with High Efficiency and Fast Control-to-output Dynamics,” JPE, Vol. 1, No. 2, October 2001.
- [22] Kyung-Hwa Park and Kang-Hyun Yi, “Cost-effective Power System with an Electronic Double Layer Capacitor for Reducing the Standby Power Consumption of Consumer Electronic Devices” Journal of Power Electronics, Vol. 13, No. 3, pp. 362-368, May 2013
- [23] M. Carbajal-Retana, J. Camacho-Cabrera, L. Hernandez-González and A. Tapia-Hernández, “Buck-inverter converter for application in inductive wireless transmission,” *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Cholula, 2018, pp. 3-7. doi: 10.1109/CIEP.2018.8573358.
- [24] J. C. Cabrera, J. F. M. Rubio, L. Hernández-González and M. C. Retana, “Modeling and Control of a Novel Buck Inverter with Application to Inductive Wireless Power Transmission,” *2018 14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Cholula, 2018, pp.77-82. doi: 10.1109/CIEP.2018.8573431

## 5. Biografías



**Luis Antonio Sotres Jara**, He is currently pursuing the M.S. Degree in the Postgraduate and Research Section of the School of Mechanical and Electrical Engineering of the I.P.N. Mexico City. He graduated in Communications and Electronics Engineering from the National Polytechnic Institute of Mexico (I.P.N.) in 2018. Since 2018, he has participated in research projects of I.P.N. His research areas are power electronics and wireless

power transfer.



**Marco Carbajal Retana**, received his M.S. Degree in the Postgraduate and Research Section of the School of Mechanical and Electrical Engineering of the I.P.N. Mexico City. He graduated in Communications and Electronics Engineering from the National Polytechnic Institute of Mexico (I.P.N.) in 2016. Since 2014, he has participate in research projects of I.P.N. His current research interests include converters CD-CD, wireless power transfer

and numeric modeling.



**Leobardo Hernandez-Gonzalez** received his B.S. degree in Electronics Communications Engineering and his M.S. degree in Microelectronics from the National Polytechnic Institute, Mexico City, Mexico, in 1991 and 2001, respectively; and his Ph.D. degree in Electronics Engineering in the area of Power Electronics from the National Center for Research and Technological Development (CENIDET), Cuernavaca, Mexico, in 2009. Since 1992, he has been working as a full-time Professor with Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME), National Polytechnic Institute, Mexico City, Mexico. His current research interests include the analysis and modeling of power devices, failure detection and characterization, and the design of electronic ballasts and wireless power transfer. He has participated as Reviewer for the IEEE Transaction on Power Electronics, Journal of Power Electronics (JPE), and Electric Power Components and Systems.



Pedro Guevara López is a doctor and teacher in computer science graduated from the Computer Research Center in 2004 and 1999 respectively, he is also an electrical engineer specializing in high voltage protection graduated from the Zacatenco Unit School of Mechanical and Electrical Engineering in 1997. He is currently a research professor at the ESIME Culhuacan unit participating in the PhD programs in Communications and Electronics, Master in Engineering Sciences in Microelectronics, Master in Engineering Sciences in Energy Systems and in the Computer Engineering degree. It has 5 doctor graduates, more than 25 masters graduates and 5 bachelor graduates. It has 3 published books, more than 15 articles in indexed journals and more than 200 articles in congresses. His research areas are real-time systems, embedded systems, system reconstruction.

# Diseño de una deshidratadora solar automatizada

J.J Dimas<sup>1</sup>, J.G Cebada,  
<sup>1</sup> universidad del Valle de Puebla  
<sup>a</sup>im35151@uvp.edu.mx, <sup>b</sup> jose.cebada@uvp.edu.mx

**Resumen**— La deshidratación permite preservar alimentos altamente perecederos, especialmente frutas y hortalizas, cuyo contenido de agua es típicamente superior al 90%. El objetivo principal de esta tecnología es reducir el contenido de humedad de los alimentos, lo cual disminuye su actividad enzimática y la capacidad de los microorganismos para desarrollarse sobre el alimento. La eficiencia del transporte de humedad desde el alimento está determinada por la resistencia interna del tejido al movimiento del agua y una resistencia externa, que se presenta entre la superficie sólida y el fluido deshidratante, el cual en la mayoría de los casos es aire. Las principales variables que modulan la velocidad del movimiento del agua en el alimento son el tiempo y la temperatura. Conforme se incrementa la temperatura, la deshidratación se acelera, pero los atributos cualitativos iniciales del alimento cambiarán drásticamente [2].

*Palabras clave.* Temperatura, Deshidratación, Humedad, Cocción

## 1. Introducción

A lo largo del tiempo, se han desarrollado tecnologías cada vez más eficientes y eficaces para la deshidratación de alimentos; estas tecnologías se relacionan directamente con el contenido de agua en los alimentos, el cual es muy variable: 60 % - 75 % en carnes, 10 % - 20 % en cereales, 80 % - 90 % en frutas y hortalizas y 90 % - 95 % en hongos comestibles [1].

Los métodos de secado se han desarrollado precisamente alrededor de los requerimientos específicos de cada producto. En todos los métodos de deshidratación, el alimento a secar se debe poner en contacto con un medio, que con frecuencia es el aire, para eliminar la humedad del producto y sus alrededores. En general, la deshidratación se conduce según dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático. En el proceso adiabático el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar, mientras que en el proceso no adiabático el calor de evaporación es aportado por el calor radiante (o transferido) a través de paredes en contacto con el material a secar. En la selección del método adecuado de secado, así como la velocidad, se deben tomar en cuenta las características de los productos a deshidratar [3].

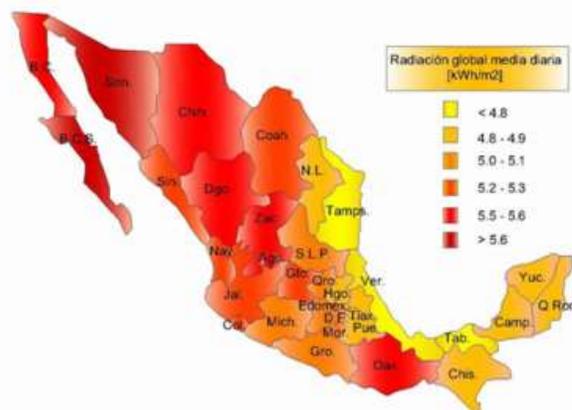


Figura 1. Radiación solar anual en México (kWh/m<sup>2</sup>) Para Puebla de entre 4.7 y 4.9 (CONAE).

La elaboración del presente proyecto tendrá como fin comprender las funciones de una deshidratadora solar de cabina directa, así como los límites de temperatura y el conjunto de sus capacidades para poder mantener un porcentaje menor de humedad.

## II. Desarrollo

Se implementa una deshidratadora solar automatizada de cajón de ochenta *centímetros* de largo por cuarenta *centímetros* de ancho con una cara superior en cristal, con el cual se poda captar la radiación solar Fig. 2.



Figura 2. Vista Superior del deshidratador solar.

Tomando la parte frontal del cajón una pequeña puerta de entrada de contenido de hojas. Fig. 3.



Figura 3. Vista Frontal

Tres ventiladores de corriente directa de doce voltios, dos en la parte trasera de la caja para introducir aire fresco y uno más en la parte lateral izquierda como extractor de aire. Fig. 4 y Fig. 5



Figura 4. Vista Trasera



Figura 5. Vista lateral Izquierda.

Una placa térmica en la parte lateral de la caja de treinta y seis centímetros de largo por veintiséis centímetros de ancho con una capacidad de diez Watts esta será encendida cuando la temperatura medida sea menor a la temperatura deseada. Fig. 6



Figura 6. Parrilla Interna

Finalmente, una fuente de voltaje industrial de lado derecho de la caja, la cual se maneja a ciento veinte de voltaje alterna, otorgando doce de voltaje directo, esta tiene como función alimentar tanto los ventiladores como la parrilla eléctrica. Fig. 7



Figura 7. Vista lateral Derecha

El diseño del deshidratador solar tiene como objetivo aprovechar la energía solar, para poder llevar una mejor deshidratación, también se logra llevar a cabo el monitoreo de su nivel de temperatura interno, para mantener la caja a una temperatura deseada del usuario para la deshidratación de distintos tipos de hojas.

Tomando en cuenta la información anterior, el diseño que se aplica para esta deshidratadora se requiere un gasto menor comparando otros métodos de secado tradicional utilizados por el área agrícola.

### A. Funcionamiento del deshidratador

Para llegar a controlar la temperatura interna de la deshidratadora se colocaron tres módulos de temperatura MLX90614, en la parte baja de la caja separados a una distancia de quince *centímetros* entre cada uno para poder obtener la temperatura promedio en toda la superficie de la deshidratadora solar. La parrilla en posición vertical se utiliza para aumentar la temperatura en casos de ausencia de radiación solar como se muestra en la figura 8.

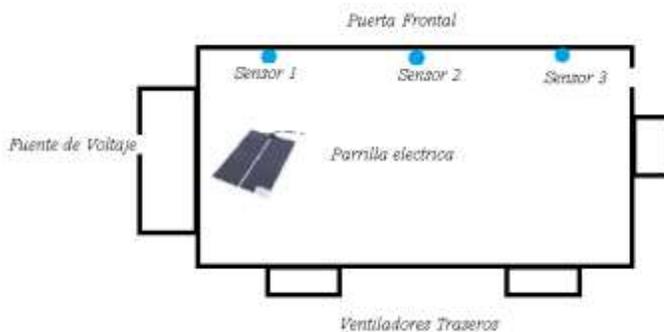


Figura. 8 distribución de prototipos.

La función del sistema se basa en una entrada y una salida, de un lazo de control clásico, con un controlador en forma de cascada como se muestra en la siguiente figura 9. (Lourdes et al. 2006)

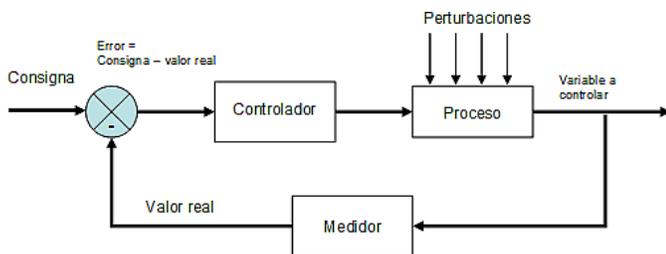


Figura 9. Control clásico

El sistema de control clásico cerrado se realiza mediante el proceso de un PID, siguiendo el control de la deshidratadora solar con el cual se toma los módulos de temperatura y la velocidad de los ventiladores que se están ejerciendo.

Continuando con la arquitectura de control que se muestra anteriormente, la relación de los elementos controlado, proceso y medidor son los siguientes.

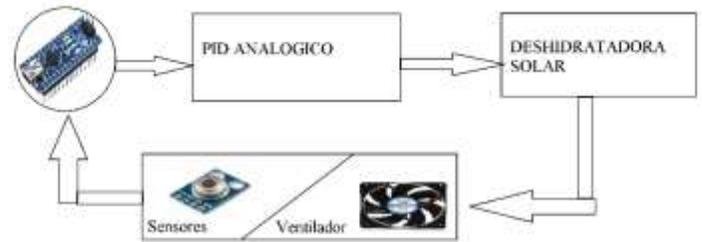


Figura 10. Lazo de control

El objetivo principal de la deshidratadora solar consiste en mantener la temperatura del interior de la caja por medio de radiación solar a treinta y cinco, cuarenta y cuarenta y cinco *grados Celsius*, con el propósito de disminuir la humedad de las hojas, con ayuda del lazo de control que se muestra en la Figura 10. Se toma en cuenta que en un determinado tiempo (t), los ventiladores se activarán en cuanto la temperatura aumenta, ciertos criterios dirigidos en la programación la velocidad de estos, tendrán diferente potencia para poder regular la temperatura que desea el usuario.

Para la regulación de velocidad de los ventiladores, se utilizan dos puentes H VNH2SP30, todo se regulará mediante la información obtenida por los módulos de temperatura MLX90614, se envía al Arduino Uno para procesar los datos con el que la temperatura actual se compara con la temperatura deseada, marcando un margen de error de la temperatura. Teniendo en cuenta la estructura de control de un PID analógico programado por computadora para poder estabilizar la cocción de las hojas, de esta manera poder conservar sus sustancias activas de las hojas

### B. Descripción del PID

Los controladores PID son comúnmente usados para sistemas industriales de control. La estructura común de el controlador es la siguiente

Se toman los valores de  $K_p$ ,  $K_d$ , y  $K_i$  las cuales son la ganancia proporcional, derivativa e integral. Como se mencionó en el párrafo anterior la variable a controlar la diferencia entre la temperatura deseada ( $T_p$ ) con la temperatura real ( $T_r$ ).

Mediante la herramienta de GUIDE-MATLAB, en el cual es la base del programa de lazo de control de la Figura 10. Obteniéndose la siguiente tabla con su gráfica.

No. de mues	Tiempo Computarizado	Temperatura Real	Error de Temperatura
1	0.005815927	30.23	19.77
2	0.075822997	30.21	19.79
3	0.14218416	30.19	19.81
4	0.212291309	30.17	19.83
5	0.285486562	30.17	19.83
6	0.359418456	30.15	19.85
7	0.434336689	30.17	19.83
8	0.511390278	30.15	19.85
9	0.591078988	30.15	19.85
10	0.672236702	30.15	19.85
11	0.755221465	30.09	19.91
12	0.842565945	30.07	19.93
13	0.928745728	30.11	19.89
14	1.022559252	30.11	19.89
15	1.136692127	30.09	19.91
16	1.240960642	30.05	19.95
17	1.339581283	30.07	19.93
18	1.436383133	30.07	19.93
19	1.534634935	30.05	19.95
20	1.634008398	30.07	19.93
21	1.737383394	30.07	19.93

Figura 10. Tabla de toma de datos en Excel

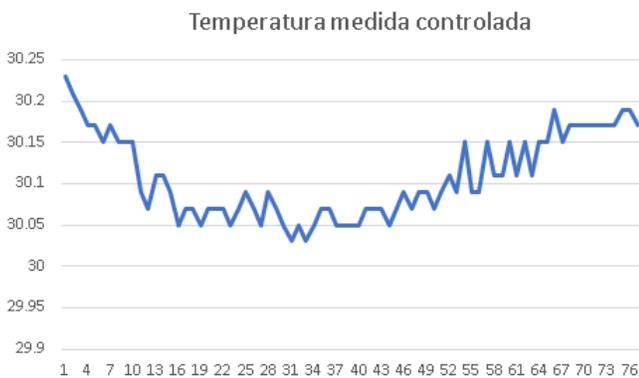


Figura 11. Grafica de control de temperatura a 30 grados Celsius

En las dos imágenes anteriores Figura 10 y Figura 11, se puede mostrar los datos obtenidos los cuales son:

- Muestras
- Tiempo Computarizado
- Temperatura Real
- Error de Temperatura

Con estos valores podemos obtener información acerca del tiempo de regula miento de temperatura, el numero de muestras obtenidas y su error de temperatura

Se muestra la siguiente grafica Figura 11. En el cual se puede visualizar un regula miento de temperatura de treinta *grados Celsius* para el secado de hierba buena, se pesó 1 *Kilogramo* de la hierba fresca, seguido se introdujo dentro de la deshidratadora sobre una malla suspendida, se monitoreo la temperatura de la deshidratadora cada minuto obteniendo una media de siete a ocho muestras por segundo. Figura 12.



Figura 12. Hoja de hierba buena a deshidratar a 30 Grados Celsius

Finalmente, después de seis horas de secado optimo de la hierba buena llego a obtener un peso de 280 gramos.

### III. Conclusiones

Los resultados demuestran que el dispositivo funciona de la manera esperada, sin embargo, se pueden apreciar que en su momento de toma de secado los módulos de temperatura tuvieron un fallo de error por al menos dos segundos cada hora obteniendo una temperatura elevada a mil doscientos cincuenta y cuatro grados Celsius, tomando en cuenta estos pequeños errores producidos en las pruebas anteriores se tomará en cuenta la capacidad de los sensores en los procesos de deshidratación próxima.

El control de sistema con la tarjeta Arduino uno, junto con la estructura de la deshidratadora solar, tomaron un valor muy importante para la deshidratación de la muestra deseada.

Finalmente, las hojas se llevaron a un laboratorio químico para poder obtener las sustancias activas de las hojas secas y poder sacar un calculo que permita conocer la temperatura y tiempo de secado exacto para las hojas como es la hierba buena y la Stevia, también conociendo que si no se lleva un control de la temperatura la deshidratadora logró llegar a temperaturas elevadas entre cien y ciento sesenta *grados Celsius*.

#### **IV. Referencias.**

- [1] Pezzutti A.; Crapiste G. H. Color changes during dehydration of onion (*Allium Cepa* L.) and garlic (*Allium Sativum* L.). *Acta Horticulturae* 433: 455-462. 1997
- [2] Muratore, G., Rizzo, V., Licciardello, F. y Maccarone, E. Partial dehydration of cherry tomato at different temperature, and nutritional quality of the products. *Food Chemistry*, 111(4):887-891. 2008
- [3] Castañeda-Miranda. Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso. 2012

#### **V. Bibliografía.**

##### **Castañeda Miranda:**

Fecha de nacimiento: Mayo 2, de 1973 ·

Formación académica

1. Técnico Industrial, CECATI NO. 81(México), (1993 - 1994).
2. Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica, UAZ (México), (1990 - 1995)
3. Maestría en Ingeniería Eléctrica, UASLP (México), (1996 - 1998).
4. Maestría en Tecnología Avanzada, CICATA (México), (2000 – 2003).
5. Doctor en Ingeniería, UAQ (México), (1999 – 2004)

Correo electrónico: [dr.alejandroc@gmail.com](mailto:dr.alejandroc@gmail.com)

Páginas-Web: [www.embeddedcastaneda.com](http://www.embeddedcastaneda.com)

# Interfaz de obtención de datos a través de Arduino y LabView, gestionados por PROLOG

Víctor Adrián Espinosa de los Monteros Parra<sup>1,a</sup>, David Tinoco Varela<sup>2,b</sup>, Fernando Gudiño Peñaloza<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería, Sección Electrónica, IME.

<sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería, Sección Electrónica, ITSE.

<sup>a</sup> victor\_aemp@hotmail.com, <sup>b</sup> dativa19@hotmail.com, <sup>c</sup> ilciarmin@gmail.com

**Resumen**— En este artículo se presenta un sistema de adquisición de datos desarrollado por medio de Arduino y LabView, datos que posteriormente son gestionados por medio de programación lógica. De esta manera se muestra la posibilidad de que el paradigma lógico de programación gestione datos que sean adquiridos desde un entorno físico, y que no solo sean datos ingresados directamente por software. Tal paradigma de programación ha sido poco explorado para la gestión, interacción y relación de datos provenientes de entornos físicos reales, por este motivo, el hecho de gestionar datos provenientes desde sensores, es una aplicación novedosa y funcional de la programación lógica.

**Palabras clave.** PROLOG, Control inteligente, Interfaces, LabView.

## 1. Introducción

La adquisición de datos obtiene un carácter primordial cuando hablamos de sistemas que deben interactuar con su entorno, o que necesitan identificar cierto tipo de información para poder predecir un comportamiento futuro de un fenómeno o circunstancia, tal como los sistemas encontrados en estaciones meteorológicas [1], en donde alguna estación busca recolectar información relacionada con la humedad, temperatura y fuerza de los vientos, con la intención de analizar tal información para predecir los cambios climáticos que puedan suceder en corto, mediano y largo plazo.

Pero no solamente las estaciones meteorológicas requieren o utilizan estos esquemas tecnológicos, en la actualidad cada día se busca más la generación de proyectos que puedan interactuar directamente con su entorno, que puedan gestionar la información obtenida por medio de sensores, y que puedan dar como resultado una respuesta adecuada a las condiciones del entorno en el que se encuentra, entre este tipo de sistemas se encuentran edificios autónomos [2], procesamiento de datos biológicos [3], experimentos nucleares [4], casas verdes [5], y el desarrollo de robots inteligentes [6].

Todo robot inteligente necesita poder interactuar con su entorno y poder obtener datos para así poder “tomar decisiones” sobre su comportamiento. Un robot que está diseñado para búsqueda de objetos, debe poder obtener información que le indique si el objeto encontrado es el deseado o no; Si un edificio inteligente quiere gestionar sus recursos internos y externos (tales como temperatura del inmueble, apertura y cerradura de puertas y ventanas, encendido de electrodomésticos automáticamente, niveles de luminosidad en su interior, etc), necesita forzosamente adquirir

datos que le indicaran la forma y la magnitud en la que tiene que modificar cada uno de los elementos de salida. Estos datos deben ser almacenados y gestionados por el sistema para poder emplearlos adecuadamente.

Hoy en día, existen diversas herramientas que se utilizan para procesar la información obtenida por medio de diferentes tipos de sensores.

PROLOG, a pesar de las ventajas que presenta cuando se trata de generación de sistemas inteligentes, es poco explorado para la gestión de datos físicos, datos que provengan del mundo real, básicamente es utilizado para analizar datos que han sido ingresados directamente por software. PROLOG ha demostrado ser útil en muchas aplicaciones, entre las que se encuentran la generación de sistemas expertos [7-9], sin embargo, han sido pocas las aplicaciones en hardware donde se ha utilizado.

En este artículo se realiza la integración de PROLOG y sus características inherentes a la inteligencia artificial, con un sistema de adquisición de datos que toma muestras de diferentes sensores tales como el sensor LM35, el HC-SR04, y un LDR (*Light-Dependent Resistor*). En este caso, se realiza un sistema que gestiona de forma inteligente, datos e información proveniente de más de una variable o sensor de entrada.

Para el desarrollo de la propuesta se ha utilizado una interfaz de interconexión realizada a través de LabView.

## 2. Preliminares

En esta sección se presentan las herramientas y conceptos básicos que integran la interfaz propuesta.

### A. LabView

De acuerdo con la página web de LabView, LabView es un software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware. Esta herramienta ha ido tomando gran importancia en el mundo de la ingeniería, debido a su gran capacidad de integración en diferentes tipos de proyectos, y principalmente a la facilidad con la que se puede programar. Básicamente LabView funciona por medio de programación gráfica, ya que en lugar de utilizar comandos en un lenguaje de programación estándar, utiliza funciones representadas por iconos y bloques gráficos. En la figura 1,

podemos ver la comparación entre una sección de código realizada en C, con respecto al mismo código realizado en LabView.

LabView ha sido parte importante de diferentes proyectos de investigación, desde sistemas de monitoreo ambiental [10], medición de sistemas eléctricos de potencia [11], monitoreo remoto de diferentes parámetros ambientales [12], hasta el análisis de señales utilizando wavelets [13].

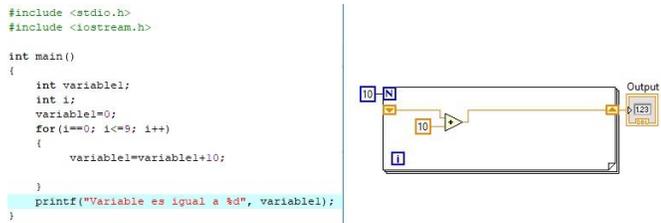


Fig. 1.- Comparación de un acumulador realizado en C, con respecto a su contraparte realizada en LabView.

### B. PROLOG

PROLOG es un lenguaje de programación enfocado principalmente a aplicaciones de inteligencia artificial (IA), este lenguaje fue desarrollado en la *Universidad de Aix-Marseille I* (Marsella, Francia) por los estudiantes *Alain Colmerauer* y *Philippe Roussel*.

Dentro de las principales características de este lenguaje se pueden mencionar: está basado en nociones matemáticas de relaciones de inferencia, su esquema de funcionamiento se basa en fundamentos lógicos, además de que un código de PROLOG se enfoca más en el conocimiento que en los algoritmos. Una característica interesante, es que a diferencia de la mayoría de lenguajes de programación, PROLOG busca llegar a un resultado, en lugar de centrarse en cómo llegar a ese resultado, se usa para representar conocimientos sobre un determinado dominio y las relaciones entre objetos de ese dominio. Para la generación de un programa en este lenguaje, es necesario tener los datos conocidos (hechos) y como se relacionan estos datos (reglas), y a partir de tales datos, poder llegar a una resolución lógica del problema planteado.

Debido a las características mencionadas, PROLOG es ampliamente utilizado en sistemas expertos (SE), en la literatura existen una gran cantidad de SE que han sido aplicados a diferentes ramas del conocimiento, se tienen desde sistemas médicos [14], detección de fallas en sistemas de distribución [15], psiquiátricos [16], entre otros.

A pesar de la facilidad inherente de PROLOG para realizar IA, este lenguaje no ha sido ampliamente explotado cuando se trata de aplicaciones de hardware, mayoritariamente se ha enfocado en aplicaciones de software y con datos que vienen directamente del usuario o de sistemas informáticos. Han existido proyectos que tratan de interactuar con elementos

reales, sin embargo, esto se ha reducido a la simulación de las variables físicas [17].

Además de los SE, este lenguaje también se ha utilizado para otro tipo de aplicaciones, tal como la generación de un paradigma computacional en el que se busca representar y controlar conversaciones computadora-humano [18].

### C. Adquisición de datos y Arduino

Un *sistema de adquisición de datos* (DAS, por sus siglas en inglés) consiste en la toma de muestras del mundo real para convertir dichas muestras en datos que puedan ser manipulados por un ordenador u otros dispositivos electrónicos. Un DAS estándar toma las muestras del entorno por medio de sensores, procesa dichas señales y las codifica para que puedan ser interpretadas por medio de diversos dispositivos electrónicos digitales (Figura 2).

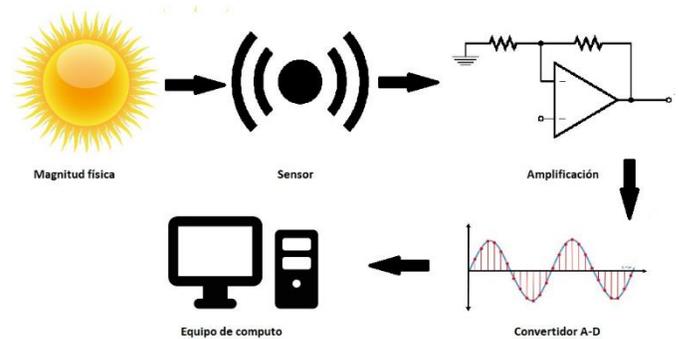


Fig. 2.- Esquema básico de un DAS.

Actualmente existe una gran cantidad de dispositivos digitales que pueden ser utilizados como DAS, entre dichos dispositivos se encuentran diferentes placas de desarrollo tales como Raspberry Pi, Beagle Bone, Arduino, entre otras; sin embargo, Arduino se ha convertido en una placa de desarrollo sumamente popular, ya que se ha convertido en el corazón de diferentes tipos de proyectos, desde los que parecen ser muy simples, hasta proyectos científicos complejos [19-22]. Este esquema nació en el *Instituto IVREA (IDII)*, en Ivrea (Italia), con la intención de lograr que usuarios no relacionados ni a la computación ni a la ingeniería, pudieran generar proyectos tecnológicos de manera fácil, logrando su cometido. Esta placa, cuenta con todo lo necesario para llevar a cabo el desarrollo de diferentes proyectos, tiene memoria RAM, memoria ROM, microcontrolador, y puertos de entrada y salida. En estos puertos es posible conectar de manera fácil y rápida diferentes tipos de sensores, y se pueden controlar diferentes tipos de actuadores.

El uso del Arduino ya ha sido explorado como sistema de adquisición de datos, tal como lo podemos observar en [23-25],

llegando incluso a generar un DAS que captura señales biométricas ECG [26], por lo que se prueba que puede ser utilizado de forma adecuada para nuestra propuesta.

### 3. Objetivo

El objetivo principal es el desarrollo de un sistema que obtenga datos desde un entorno físico a través de sistemas embebidos de bajo costo económico, en este caso Arduino. La parte importante de este esquema, es que PROLOG será el encargado de gestionar los datos obtenidos a través de los sensores, no solo guardando y mostrando información, sino también procesándola de manera inteligente.

### 4. Metodología

En esta sección, se describe la metodología realizada en el desarrollo de la propuesta, tanto el hardware como el software que ha sido utilizado.

#### A. Hardware

El hardware utilizado para esta propuesta, consta de tres sensores básicos, un LDR, un sensor ultrasónico HC-SR04 y un sensor de temperatura LM35, todos ellos previamente utilizados en diferentes proyectos tecnológicos y de desarrollo [27-35], para este caso es importante mencionar que este artículo no está enfocando en el uso de los sensores, sino en la gestión que PROLOG puede realizar con los datos obtenidos a través de estos elementos de entrada.

Para ingresar los datos, se ha utilizado una placa de desarrollo Arduino UNO. Los sensores utilizados y la placa, pueden observarse en la figura 3.

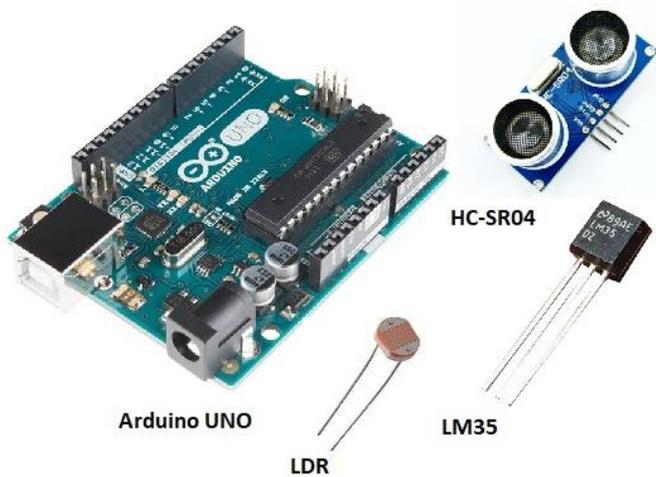


Fig. 3.- Placa Arduino y sensores utilizados.

#### B. Software

Para el desarrollo en software nos hemos servido de dos poderosas herramientas, LabView y PROLOG. LabView, se

encarga de leer la información desde la placa de desarrollo Arduino UNO, es decir, la comunicación primaria entre el hardware y una computadora, se realiza mediante la conexión Arduino-LabView, en esta forma LabView recibirá los datos y estos serán almacenados para su uso y gestión posterior realizada por PROLOG.

PROLOG, la siguiente herramienta utilizada. Sobre este lenguaje de programación recae la importancia de la propuesta, ya que este lenguaje ayudará a gestionar los datos obtenidos mediante los sensores. Como se ha mencionado anteriormente, PROLOG ha sido utilizado para gestionar datos provenientes de software, pero con menor interacción cuando se trata de datos provenientes de hardware. Debido a esta circunstancia, se busca definir el camino en el que PROLOG puede ser utilizado de manera adecuada en sistemas de interacción entorno-máquina. Planteando la posibilidad de que PROLOG pueda gestionar un sistema completo de control de edificios inteligentes.

#### C. Desarrollo del sistema de adquisición de datos

Para el desarrollo del sistema propuesto, originalmente fue realizado un primer prototipo, a partir del cual se obtuvieron los primeros datos a analizar, en este caso se trabajó con un solo sensor LDR. Este primer paso, se llevó a cabo solo para ingresar datos simples provenientes del entorno físico. La conexión de este primer paso se puede observar en la figura 4.

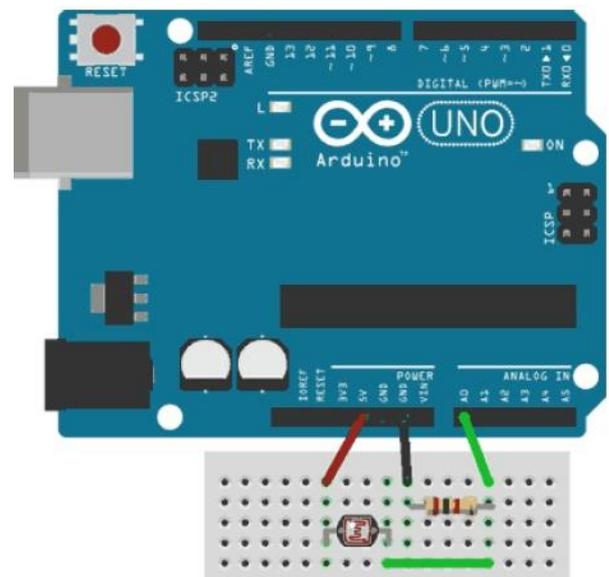


Fig. 4.- Conexión del primer experimento realizado, en este caso solo es la conexión de un sensor LDR.

Para Ingresar los datos provenientes del LDR a la computadora, se creó un programa en LabView que puede mostrarse en las figuras 5 y 6. En la figura 5 se puede ver el

diagrama de bloques que representa el comportamiento del sistema de adquisición, y en la figura 6 se observa un Instrumento Virtual (VI) sencillo que mide e identifica la cantidad de radiación lumínica que está captando el LDR.

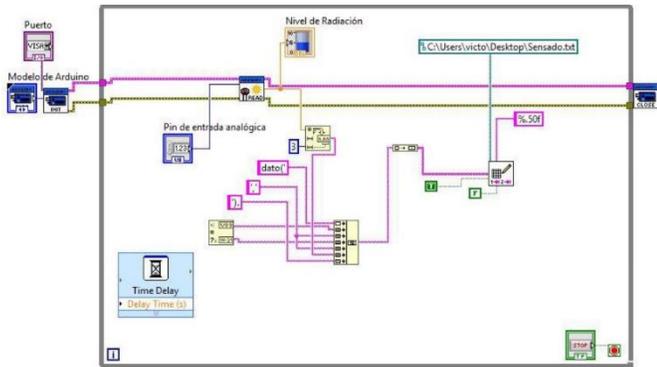


Fig. 5.- Diagrama de bloques realizado por medio de LabView, para medir la radiación lumínica captada por el LDR.

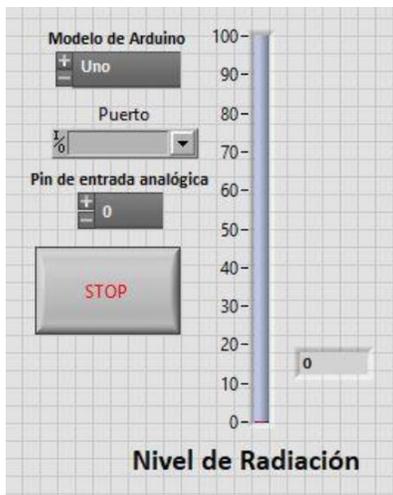


Fig. 6.- Instrumento virtual que indica la información recibida por medio del LDR.

Como se ha mencionado anteriormente, la importancia de este sistema radica en que PROLOG pueda gestionar la información proveniente del mundo físico por medio de conexiones lógicas entre los datos y funciones recursivas, y así utilizar las características inteligentes inherentes al lenguaje de programación. Debido a este motivo, es necesario realizar una interfaz en PROLOG, que pueda mostrarnos los datos obtenidos y el cómo podemos ir gestionándolos. Se ha realizado una interfaz gráfica que va a separar los datos de acuerdo con cierto tipo de características. Esa interfaz básica se puede observar en la figura 7.



Fig. 7.- Interfaz básica que ayudara a gestionar los datos obtenidos por medio de LabView.

Este primer experimento funcionó para poder gestionar los datos de un solo sensor, sin embargo, la idea general es la gestión de más de un sensor, para posteriormente tener la posibilidad de diseñar un edificio inteligente por medio de PROLOG. Teniendo esto en mente, se realizaron las modificaciones para poder gestionar más de un dato de más de un sensor a la vez.

En este segundo experimento se conectaron los sensores LM35 y el HC-SR04, las conexiones realizadas pueden verse en la figura 8.

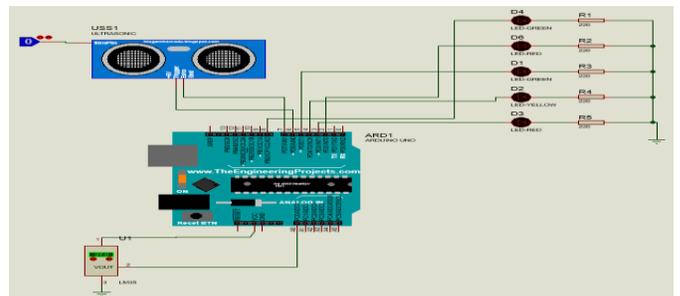


Fig. 8.- Conexiones realizadas para la gestión de más de una variable de entrada al sistema.

Los datos del sistema mostrado en la figura 8 son ingresados a un equipo de cómputo a través de la rutina realizada en LabView, mostrada en la figura 9. Como se puede observar, se ha realizado la conexión con la placa Arduino mediante la entrada serial de LINX (Jiménez, Lara y Redel [36] han propuesto una API para la comunicación entre estas dos herramientas).

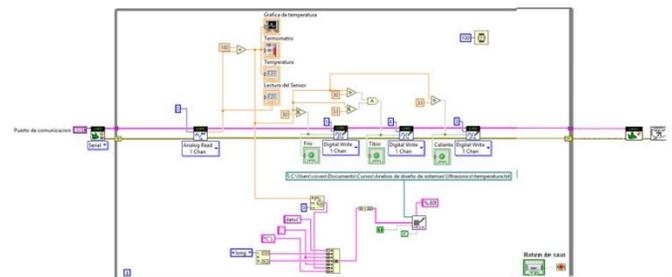


Fig. 9.- Diagrama de bloques en LabView correspondiente al sistema con más de una entrada.

Para este sistema también se generó el VI, que se muestra en la figura 10, donde se pueden ver los indicadores tiempo y distancia.

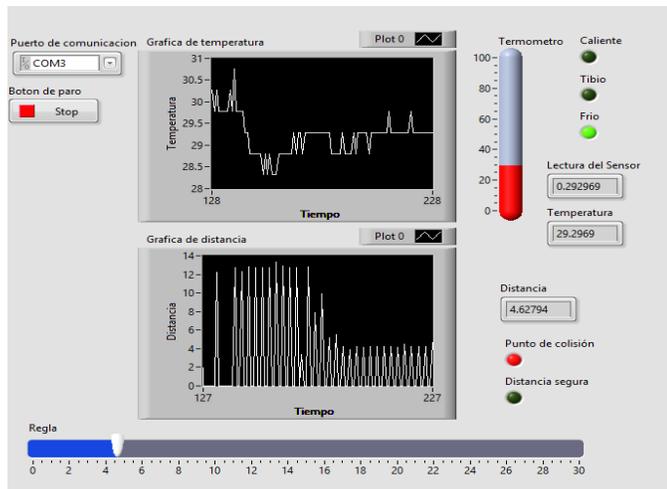


Fig. 10.- VI que representa el comportamiento de los dos sensores de entrada.

El sistema de adquisición de datos, va muestreando en tiempo real, cada una de las señales pertenecientes a las variables de entrada, y estas se almacenan de manera ordenada, tal como puede verse en la figura 11.

```
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.809°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').
dato('martes, 5 de junio de 2018', '06:46 p. m.', '28.320°C').

dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '0.000cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '27.836cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '0.000cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '29.180cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '30.490cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '0.000cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '36.819cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '31.341cm').
dato('miércoles, 6 de junio de 2018', '11:59 p. m.', '45.412cm').
```

Fig. 11.- Datos obtenidos de los sensores y almacenados de manera ordenada.

Ya que se han obtenido los datos, PROLOG puede comenzar a gestionarlos. Lo que realiza el programa desarrollado mediante este lenguaje, es generar consultas que enlazan los datos obtenidos. Cuando una consulta es realizada, PROLOG enlaza los datos para así dar como resultado un dato particular dependiendo de la característica con la que es buscado.

La interfaz en PROLOG está diseñada para buscar datos relacionados a temperatura y distancia, tal como se puede ver en la figura 12. Ya que se ha definido cuál de las magnitudes físicas será gestionada, el clasificador de información indicará que es posible realizar consultas de las características: Fecha de adquisición, hora de adquisición, y el dato en específico. Si se busca un dato definido, la interfaz devolverá las características asociadas a este dato, esta parte se puede ver en las figuras 13 y 14.



Fig. 12.- Interfaz gráfica de PROLOG donde se solicita la magnitud física a gestionar.

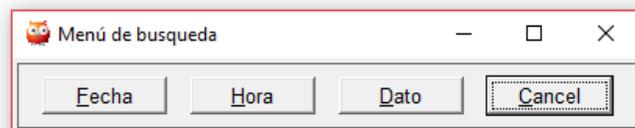


Fig. 13.- Ya que se ha escogido la magnitud física a gestionar, se solicita el tipo de característica de tal magnitud a relacionar.

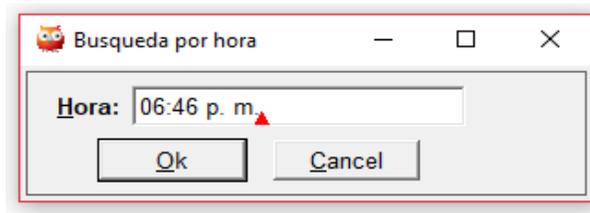


Fig. 14.- Muestra la hora en la que fue tomado un dato en particular.

## 5. Discusión

Si bien es cierto que existen otras herramientas para gestión de datos tales como SQL Workbench, lo novedoso de utilizar PROLOG, es la capacidad que tiene este lenguaje no solo de relacionar información, sino que puede generar conclusiones inteligentes a partir de los datos a evaluar. Esta característica es una gran ventaja con respecto a cualquier herramienta de gestión de datos estándar, ya que con el mejoramiento de este tipo de sistemas se busca que PROLOG gestione completa e inteligentemente sistemas domóticos o sistemas de adquisición de datos inteligentes.

Para realizar una gestión inteligente de cualquier tipo de sistema utilizando herramientas de base de datos estándar, es necesario generar las funciones desde cero que realizaran dichas tareas, sin embargo, estas características ya vienen implícitas dentro del lenguaje PROLOG, por lo que es más fácil poder diseñar un sistema inteligente, y no es necesario iniciar de cero. PROLOG, tiene la potencia suficiente para realizar relaciones lógicas, pero también está diseñado para

poder procesar implicaciones lógicas, característica que una herramienta estándar no tiene.

Generalmente, las herramientas estándar de gestión de datos son utilizadas únicamente para guardar y mostrar la información [37-39], en este caso, el sistema propuesto no solo guarda y muestra los datos, sino que también le puede dar un procesamiento y análisis inteligente.

Como se ha mencionado anteriormente, PROLOG se ha utilizado principalmente para el análisis y gestión de datos ingresados por software, sin embargo, en esta propuesta los datos vienen directamente de hardware, lo que permite que este sistema interactúe directamente con su entorno.

## 6. Resultados

Con la implementación del esquema propuesto, se ha logrado adquirir de manera exitosa la información proveniente de más de un sensor en tiempo real, esta información fue posteriormente gestionada por PROLOG por medio de relación de datos (A través de una estructura de árbol binario). A través de la interfaz creada mediante este lenguaje de programación, se pudo visualizar la información requerida, logrando tener control sobre datos particulares de cada sensor sin que la información sea mezclada o malinterpretada.

## 7. Conclusiones

En este artículo se ha presentado una forma novedosa de utilizar el lenguaje de programación PROLOG para gestionar de forma inteligente datos provenientes desde hardware.

El sistema logró la interacción entre Arduino, LabView y PROLOG para ingresar, procesar, y gestionar datos mediante relaciones lógicas.

Se lograron gestionar datos provenientes de más de un sensor ejecutándose de forma simultánea, sin que se hayan presentado errores en la gestión e identificación de las características provenientes de cada magnitud física medida. Esta es una característica muy importante, ya que de este punto se pretende partir para la generación de sistemas domóticos completos que puedan ser gestionados completamente por PROLOG, utilizando las funciones de IA inherentes al lenguaje de programación.

A diferencia de otras herramientas de control de datos, PROLOG no solamente almacena y gestiona la información, sino que también puede generar conexiones lógicas entre los datos almacenados, y llegar a “conclusiones”, las cuales despliega como resultado obtenido, este es un punto muy importante en un sistema de gestión de datos inteligente, ya que el sistema puede manejarse de manera autónoma con los datos que tiene dentro de su base de información.

## Agradecimientos

Este artículo fue apoyado por los proyectos PAPIIT IN 105219, PIAPI 1824, PIAPIME 4.31.05.19, PAPIME PE111519.

## 4. Referencias

- [1] Rosiek, S., and F. J. Batlles. "A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring." *Energy Conversion and Management* 49.12 (2008): 3746-3754.
- [2] Jain, Sarthak, Anant Vaibhav, and Lovely Goyal. "Raspberry Pi based interactive home automation system through E-mail." *Optimization, Reliability, and Information Technology (ICROIT)*, 2014 International Conference on. IEEE, 2014.
- [3] Lichter, Patrick A., and Spencer J. Lien. "Personal computer card for collection of real-time biological data." U.S. Patent No. 6,159,147. 12 Dec. 2000.
- [4] Omata, K., et al. "A data acquisition system based on a personal computer." *IEEE transactions on nuclear science* 39.2 (1992): 143-147.
- [5] Ameer, S., M. Laghrouche, and A. Adane. "Monitoring a greenhouse using a microcontroller-based meteorological data-acquisition system." *Renewable Energy* 24.1 (2001): 19-30.
- [6] Kerpa, Oliver, Karsten Weiss, and Heinz Worn. "Development of a flexible tactile sensor system for a humanoid robot." *Intelligent Robots and Systems, 2003.(IROS 2003)*. Proceedings. 2003 IEEE/RSJ International Conference on. Vol. 1. IEEE, 2003.
- [7] Liu, C.-C., Seung Jae Lee, and S. S. Venkata. "An expert system operational aid for restoration and loss reduction of distribution systems." *IEEE Transactions on Power Systems* 3.2 (1988): 619-626.
- [8] Smith, Peter. Expert system development in prolog and turbo-prolog. No. 04; QA76. 76. E95, S5.. 1988.
- [9] Eronen, Pasi, and Jukka Zitting. "An expert system for analyzing firewall rules." *Proceedings of the 6th Nordic Workshop on Secure IT Systems (NordSec 2001)*. 2001.
- [10] Koutroulis, Eftichios, and Kostas Kalaitzakis. "Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring." *Renewable Energy* 28.1 (2003): 139-152.
- [11] Fransiska, R. W., et al. "Electrical power measurement using arduino uno microcontroller and labview." *Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, 2013 3rd International Conference on. IEEE, 2013.
- [12] Călinoiu, D., et al. "Arduino and LabVIEW in educational remote monitoring applications." *Frontiers in Education Conference (FIE)*, 2014 IEEE. IEEE, 2014.
- [13] Jaber, Alaa A., and Robert Bicker. "Real-time wavelet analysis of a vibration signal based on arduino-uno and labview." *International Journal of Materials Science and Engineering* 3 (2015): 66-70.
- [14] Roventa, Eugene, and George Rosu. "The diagnosis of some kidney diseases in a small prolog Expert System." *Soft Computing Applications, 2009. SOFA'09. 3rd International Workshop on*. IEEE, 2009.
- [15] Hsu, Yuan-Yih, et al. "An expert system for locating distribution system faults." *IEEE Transactions on Power Delivery* 6.1 (1991): 366-372.
- [16] Bronzino, JOSEPH D., RALPH A. Morelli, and J. W. Goethe. "Overseer: a prototype expert system for monitoring drug treatment in the psychiatric clinic." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 36.5 (1989): 533-540.
- [17] Cheng, S. J., O. P. Malik, and G. S. Hope. "An expert system for voltage and reactive power control of a power system." *IEEE Transactions on Power Systems* 3.4 (1988): 1449-1455.
- [18] Morelli, R. A., J. D. Bronzino, and J. W. Goethe. "A computational speech-act model of human-computer conversations." *Bioengineering Conference, 1991., Proceedings of the 1991 IEEE Seventeenth Annual Northeast*. IEEE, 1991.
- [19] Al-thobaiti, Bader MO, et al. "Design and implementation of a reliable wireless Real-Time home automation system based on Arduino uno single-board microcontroller." *International journal of control, Automation and systems* 3.3 (2014): 11-15.
- [20] Fransiska, R. W., et al. "Electrical power measurement using arduino uno microcontroller and labview." *Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME)*, 2013 3rd International Conference on. IEEE, 2013.
- [21] Teikari, Petteri, et al. "An inexpensive Arduino-based LED stimulator system for vision research." *Journal of neuroscience methods* 211.2 (2012): 227-236.

- [22] Juang, Hau-Shiue, and Kai-Yew Lurr. "Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board." *Control and Automation (ICCA), 2013 10th IEEE International Conference on.* IEEE, 2013.
- [23] Shajahan, Altaf Hamed, and A. Anand. "Data acquisition and control using Arduino-Android platform: Smart plug." *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on.* IEEE, 2013.
- [24] Faris, Diaa Mehdi, and Diaa Mehdi Faris Mahmood Basil Mahmood. "Data acquisition of greenhouse using Arduino." *Journal of University of Babylon* 22.7 (2014): 1908-1916.
- [25] Misiruk, I. O., et al. "Data acquisition system based on Arduino platform for Langmuir probe plasma measurements." *Applied Physics and Engineering (YSF), 2016 II International Young Scientists Forum on.* IEEE, 2016.
- [26] Alves, Ana Priscila, et al. "BITalino: A Biosignal Acquisition System based on the Arduino." *BIODEVICES.* 2013.
- [27] Kumar, N. P., & Jatoh, R. K. (2015, May). Development of cloud based light intensity monitoring system using raspberry Pi. In *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)* (pp. 1356-1361). IEEE.
- [28] Salim, G. M., Ismail, H., Debnath, N., & Nadya, A. (2015, October). Optimal light power consumption using LDR sensor. In *2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)* (pp. 144-148). IEEE.
- [29] Wazed, M. A., Nafis, N., Islam, M. T., & Sayem, A. S. M. (2010). Design and fabrication of automatic street light control system. *Engineering e-Transaction*, 5(1), 27-34.
- [30] Da Silva, D., & Acosta-Avalos, D. (2006). Light dependent resistance as a sensor in spectroscopy setups using pulsed light and compared with electret microphones. *Sensors*, 6(5), 514-525.
- [31] Asadullah, M., & Ullah, K. (2017, April). Smart home automation system using Bluetooth technology. In *2017 International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)* (pp. 1-6). IEEE.
- [32] Madli, R., Hebbar, S., Pattar, P., & Golla, V. (2015). Automatic detection and notification of potholes and humps on roads to aid drivers. *IEEE sensors journal*, 15(8), 4313-4318.
- [33] Poonam, Y. M., & Mulge, Y. (2013). Remote temperature monitoring using LM35 sensor and intimate android user via C2DM service. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, 2(6), 32-36.
- [34] Silva, J. L. D. S., Melo, M. C., Camilo, R. D. S., Galindo, A. L., & Viana, E. C. (2014). Plataforma Arduino integrado ao PLX-DAQ: Análise e aprimoramento de sensores com ênfase no LM35. *XIV Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe (ERBASE). Feira de Santana, BA.*
- [35] Mansor, H., Shukor, M. H. A., Meskam, S. S., Rusli, N. Q. A. M., & Zamery, N. S. (2013, November). Body temperature measurement for remote health monitoring system. In *2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)* (pp. 1-5). IEEE.
- [36] Jiménez, Francisco Javier, F. Ramon Lara, and Maria Dolores Redel. "API for communication between Labview and Arduino UNO." *IEEE Latin America Transactions* 12.6 (2014): 971-976.
- [37] Fernández, Jorge Pérez. *Diseño de una arquitectura IoT para el control doméstico basado en Arduino.* Doctoral Dissertation. 2017.
- [38] Dennis, Andrew K. *Raspberry Pi home automation with Arduino.* Packt Publishing Ltd, 2013.
- [39] Osegi, N. E., and P. Enyindah. "GOEmbed: A Smart SMS-SQL Database Management System for Low-Cost Microcontrollers." *African Journal of Computing & ICT* 8.2 (2015).

## 5. Biografías

**Víctor Adrián Espinosa de los Monteros Parra1.** Actualmente culminando la carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica. HA realizado sus estudios de licenciatura en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Cursó un

semestre de Movilidad en la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá en la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

**David Tinoco Varela.** Actualmente profesor adscrito al departamento de ingeniería, sección electrónica en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). HA impartido diferentes conferencias científicas y de divulgación en forma nacional e internacional.

**Fernando Gudiño Peñaloza:** Profesor adscrito al departamento de ingeniería, sección electrónica en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán (FESC). Ingeniero Mecánico Electricista, egresado de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM. Maestro y Doctor en ciencias computacionales por el Tecnológico de Monterrey.

# Sistema para la detección de placas de automóviles para ayuda a evitar el robo de automóviles

G. García Barranco, J. Espíndola Flores, M. Larios Gómez <sup>a</sup>, J. Francisco Leyva Bonilla, Hilario Salazar Martínez

*Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*

*Facultad de ciencias de la computación*

*<sup>a</sup> mariano.larios@correo.buap.mx*

**Resumen**—Este proyecto se realizó con la herramienta de simulación MatLab, y consiste en procesar imágenes digitales como una propuesta de solución al problema de seguridad en el robo de automóviles, este trabajo de investigación se basa en un principio en fotos de automóviles, enfocadas a las placas, es necesario tener una buena toma de foto ya que se requiere que sean visibles todos los caracteres de la placa del automóvil.

El sistema inicia con pasar la imagen a escala de grises, ya que así es como se puede trabajar mejor, se le aplica algunos filtros, esto se realiza para obtener las mejores pertenencias de la imagen, después de todo esto se realiza la segmentación de la imagen, se refiere a obtener solamente la parte rectangular de la placa, con esto se obtiene solamente la placa, se vuelve hacer el procedimiento de segmentación, para esta vez obtener solamente los caracteres de la placa. Como resultado se obtienen son los caracteres de la placa. Este programa se puede complementar para realizar acciones más avanzadas en la seguridad.

*Palabras clave.* Procesamiento digital de datos, histograma, sistemas de ayuda, OCR.

## 1. Introducción

El procesamiento digital de imágenes es un campo de gran interés en la actualidad, esto se debe a que un gran porcentaje de información que se obtiene es por la visión artificial. Este método presenta una gran relevancia, en el cual los investigadores han desarrollado aplicaciones en distintos campos, como la agroindustrial, medicina, seguridad entre otros. También se han desarrollado algoritmos para dar solución a los problemas como la detección, identificación y clasificación de objetos.

En este programa permite la identificación de caracteres de una placa de automóvil, de modo que brinde una solución a la problemática que se tiene al no obtener información inmediata de los automóviles, en situaciones donde en la seguridad es muy útil.

En este trabajo se presenta el desarrollo del proyecto, explicando de manera breve todo lo que se utilizó, cómo es la imagen, su histograma y los filtros, también se presenta el código y los resultados obtenidos en las pruebas que se realizaron. Contiene el estado de arte, donde se presenta en manera de resumen algunos trabajos similares a este proyecto, se pueden observar los temas similares con los que trabajaron y los recursos que se utilizaron.

Los proyectos de procesamiento de digital de imágenes son cada vez más populares, la manera de trabajar con imágenes es muy factible y no se necesita de mucha capacidad de máquina para poder desarrollar un trabajo, también ahora todo se desea trabajar con visores digitales, en el caso de este programa obtiene de manera fácil los caracteres de una placa de carro a través de una foto.

En la actualidad existe mucha información sobre el tema de procesamiento de imágenes, también algoritmos y herramientas para poder trabajar de una manera más factible.

Los objetivos generales en este proyecto, se trata de realizar el código de procesamiento digital de imágenes, así como el de poder ayudar a la ciudadanía con el robo de automóviles y realizar la publicación de este proyecto en una revista de ciencia y tecnología para aportar información que sea útil a la sociedad.

Obtener ingresos económicos. Se cree que este proyecto pueda ser financiado por el gobierno, ya que los ayudaría a combatir la delincuencia en la zona.

Obtener reconocimiento científico. Desarrollado y publicado este proyecto, se da a conocer el trabajo de investigación que se está realizando en la campo de la ciencia y la tecnología, así poder obtener el reconocimiento de la comunidad científica.

Aportar un trabajo de procesamiento digital de imágenes, utilizando algoritmos ya existentes, modificándolos para tener un mejoramiento.

Desarrollar más aplicaciones. En la actualidad las aplicaciones son muy utilizadas, por eso es que la mayoría de los proyectos tecnológicos desarrollados se convierten en aplicaciones móviles o web.

## 2. Estado del arte

EL procesamiento de imágenes con visión artificial para el reconocimiento de placas vehiculares es de mucha ayuda en el robo de vehículos, es por tal su importancia. El siguiente presenta el reconocimiento de placas vehiculares a través del procesamiento de imágenes con visión artificial para el control automático de acceso al campus de la Universidad Técnica de Ambato (UTA). Esta investigación parte desde la obtención de la imagen a través de la utilización de una cámara con Protocolo de Internet, por sus siglas en inglés IP, se procesa y corrige la imagen con el desarrollo de algoritmos dentro del entorno de programación LABVIEW versión 2013, el mismo que utiliza la extracción de características de la región de interés mediante el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) con un proceso de binarización de la imagen, lo que da como resultado, una cadena de caracteres con los números y letras de la placa del vehículo que son comparados con una base de datos de autos registrados que ingresan al campus. Con los caracteres de la placa ingresados en el sistema y comparados con la base de datos se realiza un control de ingreso, y si el vehículo está registrado como usuario del Sistema de Control de Ingreso Vehicular de la UTA Campus Huachi, la aplicación

envía la instrucción de abrirse a las barreras de ingreso o salida a través de una interfaz de control electrónico con sensor infrarrojo y comunicación a través de Arduino.

Reconocimiento de placas vehiculares mediante procesamiento de imágenes para optimizar el acceso a los parqueaderos de la UTA, Campus Huachi

En el presente proyecto de investigación se crea una aplicación de reconocimiento de placas vehiculares mediante técnicas de procesamiento de imágenes. El proceso de imágenes es mucho más que una simple transformación de escala de grises o binaria. [1]

En el contexto de este trabajo este proceso ha constituido transformaciones sistemáticas de la imagen en escala de grises a imagen binaria (blanco/negro), realizada con diferentes rangos de intensidad, y posteriormente se realiza un análisis de partículas con la intención de encontrar las coordenadas de la placa vehicular como un objeto dentro de la imagen total.

Cuando se obtiene las coordenadas de la pequeña imagen de la placa se aplica el OCR (Reconocimiento Óptico de caracteres), con plantillas de letras anteriormente introducidas en la aplicación, lo que da como resultado una cadena de caracteres con los números y letras de la placa del vehículo. [2]

Diseño de un sistema de acceso vehicular a la PUCP basado en tecnología RFID y detección de placas vehiculares

El desarrollo de esta tesis se centra en el rubro de los estacionamientos, particularmente al interior de la PUCP y, por ello el control de los ingresos vehiculares permitirá conocer el correcto uso de los estacionamientos y también asegurar que solo usuarios válidos puedan ingresar a la PUCP. Por ello, en este presente trabajo de tesis se plantea un sistema de acceso vehicular a la PUCP usando principalmente dos tecnologías. [3]

Diseño e implementación de un software de reconocimiento de placas vehiculares en tiempo real.

El presente documento tiene como objetivo describir el desarrollo de un software para la captura y reconocimiento de placas vehiculares, el cual puede implementarse como apoyo a sistemas de vigilancia en parqueaderos y en la vía como complemento al sistema de tránsito. Metodológicamente se desarrolla una investigación de tipo descriptiva, las fases de desarrollo se realizan de acuerdo a l ciclo de vida del software. Los resultados permiten observar que, para obtener imágenes de mejor calidad, se requieren cámaras y monitores de altas resoluciones. [6]

Detección de caracteres de placas de automóviles mediante técnicas de visión artificial.

La presente tesis desarrolla un sistema que implementa técnicas de visión artificial en Matlab, con el fin de proveer información instantánea de la identificación de placas de vehículos, facilitando la toma de acciones en el momento preciso que ocurren los sucesos. De esta forma, se ofrece una solución a los problemas de seguridad que aquejan diariamente a la ciudad. Asimismo, se busca fomentar el uso de algoritmos de visión artificial para el procesamiento digital de imágenes con enfoque en diversos campos como las agroindustrias,

biomedicina, seguridad entre otros, que pueda generar propuestas de inversión y desarrollo para la comunidad. [7]

Reconocimiento de placas vehiculares en tiempo real por medio de visión artificial.

Tomando en cuenta el sistema actual de la Universidad Central del Ecuador para el control de acceso vehicular el presente trabajo; Aborda la investigación de la disciplina de Visión Artificial que se aplica con el objetivo de adquirir, procesar y analizar imágenes que surgen constantemente en el mundo real, obteniendo un funcionamiento similar al sentido de la vista del ser humano; y el diseño de un prototipo aplicado al reconocimiento de placas vehiculares con formato XXX-### o XXX-####, haciendo uso del lenguaje de programación Python, la librería OpenCV y también conjuntos de imágenes de distintas fuentes para evaluar el modelo propuesto en el prototipo. [2]

Sistema de identificación de placas vehiculares con técnicas de visión computacional.

Este trabajo desarrolla un problema de visión computacional, para el reconocimiento óptico de caracteres (OCR) en sistemas de reconocimiento automático de número de placa (ANPR). El sistema se integra por los módulos siguientes: Obtención de un archivo de imagen de extensión BMP, así como la extracción de sus características: ancho, largo y matriz de datos. Separación de los caracteres, del resto de la imagen la segmentación de los caracteres de la placa reconocimiento de los caracteres de la placa. [8]

Método para el reconocimiento de placas de vehículos del estado de Chihuahua.

El método propuesto resuelve el reconocimiento de placas de los vehículos, utilizando técnicas de procesamiento de las imágenes. Las imágenes fueron procesadas en blanco y negro aplicando un filtro High-Boost que durante el proceso elimina partes que no son de interés a la imagen y se eliminan partes que no son de interés binariza y erosiona de forma consecutiva, hasta tener caracteres bien legibles de tal forma que el proceso de reconocimiento de caracteres pueda identificar adecuadamente las letras y números de la placa. Para el desarrollo del sistema propuesto se utilizó una base de datos de 17 imágenes digitales de placas del estado de Chihuahua, y los resultados muestran una efectividad de 88.23% de las 17 imágenes de placas solamente en 15 se mostraron los caracteres de la placa correctamente. [5]

## 2. Parte técnica del artículo

### A. Análisis de la imagen

El programa se desarrolló en Matlab, ya que en este software se puede trabajar con el procesamiento digital de imágenes. Se desarrolló el código del programa, tomando en cuenta los filtros que se utilizarían en el proceso, y también los ajustes a la imagen para obtener como resultado solo los caracteres. Lo siguiente que se realizó fue obtener las imágenes para utilizarlas en las pruebas en el programa, estas imágenes se obtuvieron de una cámara digital.

La manera como se trabaja con imágenes, es por medio de matrices, hay un teorema que explica como lo realiza, se trata del teorema de convolución, es un filtro lineal que realiza operaciones de pixel por pixel que permite conectar dos funciones continuas o discretas en una sola. Se representa por la ecuación (1).

$$I'(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (x - i, y - j) \cdot H(i, j) \quad (1)$$

Para iniciar con el procesamiento de la imagen es necesario pasarla a escala de grises, como se muestra en la fig. 1



Fig 1. Imagen capturada

Es importante conocer las propiedades de las imágenes con las que se va a trabajar, para eso se utiliza el histograma, que es la representación gráfica de la distribución de frecuencia de la imagen, cómo se muestra en la fig. 2

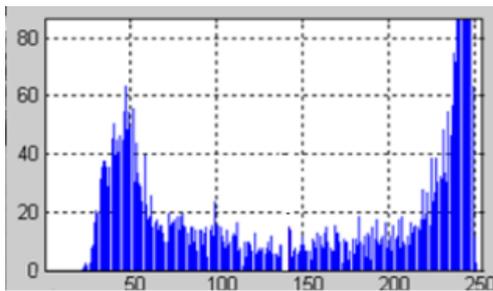


Fig 2. histograma de la imagen

## B. Proceso de la imagen

Después se desarrolla el programa tomando en cuenta el uso de los filtros que son necesarios y de operaciones matemáticas que se requieren, para este programa se aplican el filtro de Sobel.

Una de las operaciones importantes que se utiliza es la binarización, que consiste en reducir la información de la imagen, cómo lo muestra en la fig. 3. Para concluir se realiza el recorte de la imagen, que sólo consiste en designar un tamaño adecuado a la ventana del programa, una región rectangular.



Fig 3. Binarización

Es muy importante el orden en que se va a utilizar, porque de no ser una forma correcta se puede alterar los resultados del programa.

Una vez terminado el programa se realizan las pruebas suficientes, que en este caso se le conoce como el entrenamiento del programa para obtener las estadísticas del programa y hacer las correcciones necesarias. Por último se vuelve a realizar pruebas al programa, en este caso se trata de la prueba final del programa en donde ya está trabajando con imágenes obtenidas en tiempo real.

El código que se utilizó para realizar este programa, se formó con funciones, que se están diseñadas para realizar cada modificación del programa a la imagen, como es el caso cuando se aplica la binarización, cómo lo muestra la fig. 4 en ella se puede visualizar la función, que sólo consiste en unas cuantas líneas, así es en el caso de las otras funciones, son fragmentos pequeños de código que pueden hacer toda esa tarea posible, que de no ser así, sería muy difícil trabajar sin estas herramientas.

Las imágenes se trabajan con el formato RGB, esto quiere decir que los colores base con Rojo, Azul y Verde, tienen un valor de 255 bits en cada color. Por eso es que en la mayoría del código trabaja de esta manera.

El código inicia con la función de binarización, en la línea 2 es donde se lleva a cabo la lectura de la imagen, a través de su nombre, es importante mencionar que esta instrucción sólo funciona con los siguientes tipos de imagen GIF, CUR, ICO, TIF y HDF4. La línea 4 es donde establece el tamaño y en las siguientes líneas, inicia dos ciclos para poder recorrer cada pixel de la imagen, la última parte del código actualiza la variable en donde se coloca la nueva versión.

```

1 function y = Binarizacion(imagen, umbral)
2 im=imread(imagen);
3 imD=double(im);
4 [f,c]=size(imD);
5 for i=1:f
6     for j=1:c
7         if imD(i,j)<=umbral
8             nuevaI(i,j) = 0;
9         else
10            nuevaI(i,j) = 255;
11        end
12    end
13 end
14 imB = uint8(nuevaI);
15 imshow(imB);
16 y = nuevaI;

```

Fig 4. Código de binarización

## C. Resultados obtenidos

Se realizaron 45 pruebas en total, utilizando 15 imágenes distintas, a cada imagen se le hicieron 3 pruebas. Esto debido a que en cada intento se le realizaba un mejoramiento al programa.

La selección de las imágenes se llevó a cabo tomando en cuenta que fueran de diferente enfoque, acercamiento y tipo de placa. Para clasificar los resultados obtenidos, se dividieron en 3 casos, con éxito, incompleta y sin éxito.

En la Fig. 5 muestra un resultado exitoso, de la última modificación que se le realizó al programa, y presenta un buen resultado, ya que no hubo problemas con la imagen, esto quiere decir que tienen un buen enfoque, intensidad y acercamiento,

también no presenta ruido. Esto quiere decir que las modificaciones que tuvo el programa fueron muy útiles, para poder lograr esto.

Este es el resultado que se busca, porque a simple vista se pueden visualizar sin ningún problema los caracteres que están en la placa, y pueden ser utilizados inmediatamente.

En la Fig. 6 muestra un resultado incompleto, de la última modificación que le realizo al programa.

En este caso la imagen tuvo un buen enfoque e intensidad, pero muestra ruido, lo más probable es que para este tipo de imagen se necesita un aplicar un filtro especial, para poder limpiar la imagen en su totalidad.

Esto no quiere decir que el resultado sea de todo malo, ya que si es útil, pues a simple vista se puede distinguir los caracteres que se encuentra en la placa

En la Fig. 7 muestra un resultado sin éxito, de la última modificación que se le realizo al programa. En este caso lo que se obtuvo no es útil, ya que lo no funciono fue el recorte que se le aplica la imagen, se puede ver que claramente que el recorte presenta a la placa completamente, además también presenta ruido. La causa de esto se debe a que la imagen de prueba no tiene un buen enfoque a los caracteres de la placa. También presenta mucho brillo en la placa y algunos caracteres en color blanco, lo cual quiere decir que no solución a este problema.



Fig 5. Con éxito



Fig 6. Incompleta



Fig 7. Sin éxito

### 3. Conclusiones

La conclusión de este programa, está basado en los resultados que se obtuvieron, al realizar las pruebas, todo esto lo presentamos en una gráfica, en la fig. 8 se muestra la gráfica de las pruebas que se le realizaron al programa, en ella presenta 3 líneas que indican la clasificación de las pruebas, estas son de diferente color, verde para la primera prueba, azul, para la segunda prueba y roja para la tercera prueba.

Presenta la clasificación de los resultados, incompleta y sin éxito. También en las líneas se muestra el número que tuvo cada clasificación.

El promedio de éxitos que tuvo el programa es mayor, que el de sin éxitos, y en los resultados incompletos no hay mucho problema, porque solo fueron defectos de la imagen que no hace que tenga un éxito total, pero si distinguen los caracteres, esto quiere decir que estos resultados pueden funcionar, pero tendrían una probabilidad de error.

Este programa puede ser utilizado en el campo de la seguridad, para ayudar a la sociedad a prevenir los robos, que últimamente son muy constantes.

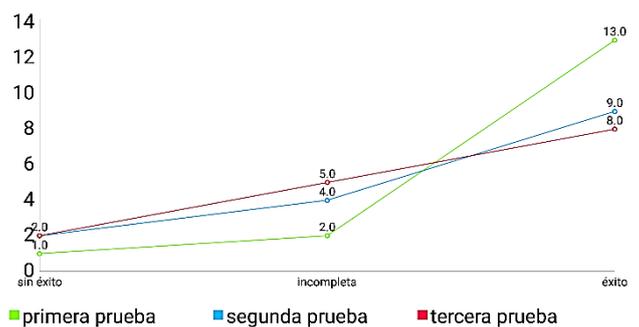


Fig 8. Gráfica de pruebas

### 4. Referencias

- [1] Aldás Salazar, D., Collantes Vaca, S., & Reyes Vásquez, J. (2016). Procesamiento de imágenes con visión artificial para el reconocimiento de placas vehiculares. SATHIRI: Sembrador, (11), 133-143. Consultado de <http://revistasdigitales.upec.edu.ec/index.php/sathiri/article/view/15>.
- [2] Fernández Paucar, Guisela Maritza; Quinatoa Alomoto, Jessica Marisol (2017). Reconocimiento de placas vehiculares en tiempo real por medio de visión artificial caso: Universidad Central del Ecuador. Trabajo de Graduación previa la obtención del Título de Ingeniero Informático. Carrera de Ingeniería Informática. Quito: UCE. 70 p. Consultado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/11755>.
- [3] Gomero Vásquez, Luis Enrique. (2016). Diseño de un sistema de acceso vehicular a la PUCP.
- [4] basado en tecnología RFID y detección de placas vehiculares. Pontificia Universidad Católica del Perú. Consultado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/9388>.
- [5] Huerta Durazo, José Alejandro. 2016. Método para el reconocimiento de placas de vehículos del estado de Chihuahua. Trabajos recepcionales Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales. Consultado de <http://hdl.handle.net/20.500.11961/2976>.

- [6] Márquez Rodríguez, Luis Manuel. (2006). Diseño e implementación de un software de reconocimiento de placas vehiculares en tiempo real. Ingeniería de Sistemas. Consultado de <http://hdl.handle.net/10596/21319>.
  
- [7] Mundaca Vidarte, George Antonio. (2016). Detección de caracteres de placas de automóviles mediante técnicas de visión artificial. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú. Consultado de <https://hdl.handle.net/11042/2578>.
  
- [8] Ruiz Delgado, Iván Abel. (2012). Sistema de identificación de placas vehiculares con técnicas de visión computacional. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, 2010. Archivo PDF, (98 páginas). Consultado de <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/9038>.

# Diseño e implementación de un registrador de datos usando códigos BCH sobre un microcontrolador de ultra bajo consumo

R. García-Hernández<sup>1,a</sup>, N. A. Rodríguez-Olivares<sup>2,b</sup>, S. Esquivel-García<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Depto. de Sistemas Inteligentes Multimedia

<sup>2</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Depto. de Energía

<sup>a</sup> rommelgh@gmail.com, <sup>b</sup> noeamir@gmail.com, <sup>c</sup> eg.saul@gmail.com

**Resumen**—En este trabajo se reporta la propuesta arquitectural de un registrador de datos enfocado a las redes de sensores con canales ruidosos. La solución propuesta es implementar códigos BCH para detección de errores en el microcontrolador msp430f5529 el cuál es un dispositivo de ultra bajo consumo. Además, se reporta un variante de la arquitectura que agrega confidencialidad de la información con el algoritmo AES-128. Se expone una arquitectura que permite la comunicación mediante UART a 115200 baudios entre una PC y el msp430, que es capaz de cifrar los datos de entrada y generar códigos BCH, y escribir la memoria Flash interna del microcontrolador.

**Palabras clave.** AES, BCH, MSP430, Cybersecurity, ECC.

## 1. Introducción

En la actualidad, existen múltiples aplicaciones que funcionan a partir de datos provenientes del medio ambiente. Los dispositivos encargados de tomar muestra de estos datos son conocidos como sensores. En ingeniería, un dispositivo ampliamente difundido para almacenar la información proveniente de los sensores es el registrador de datos o datalogger. Este último, se implementa comúnmente con memorias NAND Flash por su bajo consumo de energía y alta densidad de almacenamiento [2].

En las redes de sensores es común encontrar dispositivos con limitados recursos computacionales [1]. Existen diversos retos de integridad de la información cuando los canales de comunicación son sensibles a las alteraciones en el medio de transmisión [2]. Además de esto, la privacidad, autenticidad y confidencialidad se han convertido en una necesidad en los sistemas computacionales[3].

Por otro lado, existen diversos esfuerzos para solventar el problema de la integridad de la información en canales ruidosos. Muchos de estos se enfocan en la implementación eficiente de códigos de corrección de errores y cifrado [4, 5]. En este documento, el estudio se enfoca en exponer la propuesta de un datalogger de ultra bajo consumo con corrección de errores basado en BCH y cifrado con AES-128.

## 2. Parte técnica del artículo

El sistema implementado tiene una interfaz con el exterior por medio del sw Matlab. Principalmente, se destacan tres funcionalidades, a) programación de llave de 128 bits, b) escritura de una señal de entrada con precisión de un byte, y c) lectura byte a byte de una señal desde la memoria Flash. La funcionalidad inicia con un primer byte que indica el comando a procesar, los bytes pueden ser uno de los valores enteros del código ascii T (leer), K (programación de llave) y R (escribir). En la Figura 1, se muestra el diagrama de estados del sistema implementado, así como, la secuencia interna para procesar cada operación.

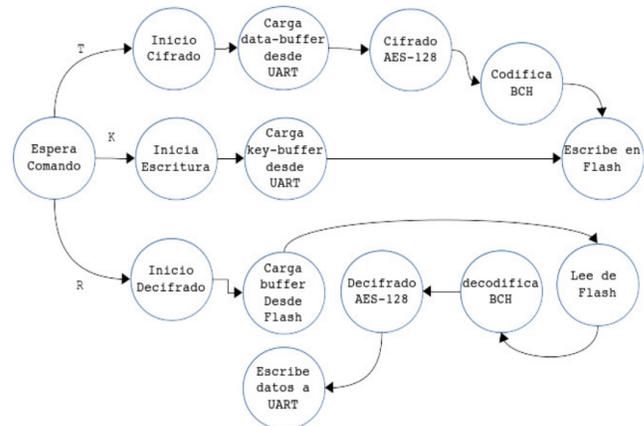


Fig 1. Diagrama de estados del sistema con BCH y AES-128.

En la etapa de corrección de errores se eligió el método BCH(31, 16, 3) que permite codificar datos de 16 bits en codewords de 31 bits, y con esto, es posible corregir hasta 3 errores en el codeword. El motivo de la elección es la relación entre los 16 bits del codeword y los datos que se envían desde la fuente de información. Por otro lado, la elección del AES-128 se motiva por su amplio uso en sistemas de criptografía de llave privada y su implementación en sistemas de llave pública [6].

La primera propuesta de solución es la arquitectura arq-1, que es la arquitectura arq-2 sin etapa de cifrado. En esta arquitectura se utiliza la sección Info A e Info D del msp430 para almacenar información en la memoria no-volatil, la información proviene

de la comunicación serial. Esto se gestiona desde una aplicación en Matlab, véase la Figura 2.

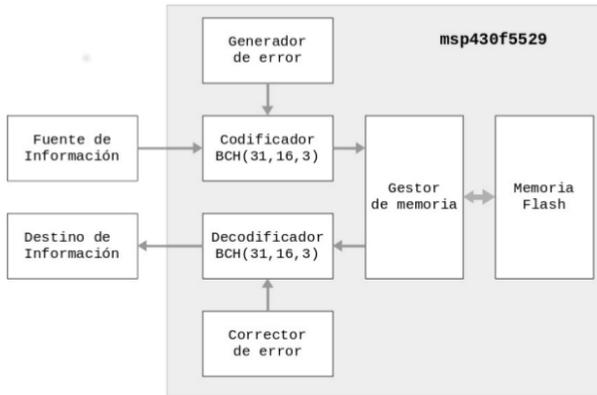


Fig 2. Arquitectura arqu-1 que implementa BCH(31,16,3).

Por otro lado, la arquitectura agrega una etapa de cifrado con AES-128, el funcionamiento de esta arquitectura requiere de tener una llave de 128 programada también en Flash, esto último se logra con la sección Info D del msp430 y una aplicación en Matlab, véase la Figura 3.

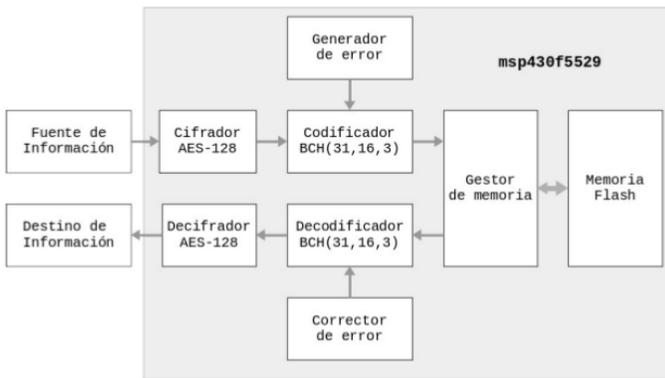


Fig 3. Arquitectura arqu-2 que implementa BCH(31,16,3) y AES-128.

El principal escenario se trata de la programación de una llave privada en memoria Flash, posteriormente el grabado de información enviada desde una PC usando la plataforma Matlab, y finalmente, la obtención de la información desde el msp430 hacia la PC. Al terminar el ciclo, las señales enviada y recibida son comparadas y se muestran a continuación.

La Figura 4 muestra la señal transmitida para su cifrado y codificación en el msp430 en la parte superior, mientras que, la señal alquirida después de la decodificación y cifrado se muestra en la parte inferior.

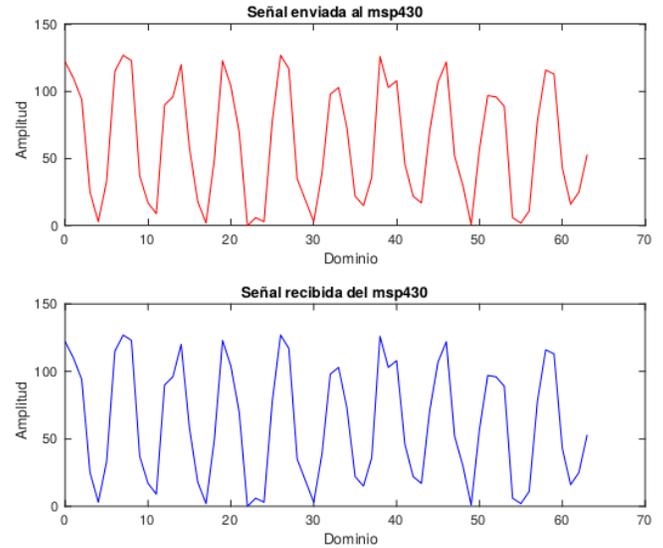


Fig 4. Arquitectura arqu-2 que implementa BCH(31,16,3) y AES-128.

### 3. Conclusiones

En este trabajo, se aplican dos importantes componentes de las comunicaciones digitales, por un lado la corrección de errores con el BCH(32, 16, 3) y el cifrado con el AES-128. Se obtuvieron resultados sobre el microcontrolador msp430f5529 utilizando dos de sus segmentos de información (A y D) en memoria flash para almacenar información proveniente del puerto serial por medio de protocolo UART a 115200 baudios. Con esto, se establece un precedente para trabajo futuro sobre esta arquitectura en el área de codificación y cifrado para dispositivos de ultra-bajo consumo.

### 4. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden el que fueron referidas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la forma deseada de incluirlas.

- [1] E. Wenger, "Hardware architectures for msp430-based wireless sensor nodes performing elliptic curve cryptography," in Applied Cryptography and Network Security, M. Jacobson, M. Locasto, P. Mohassel, and R. Safavi-Naini, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 290–306.
- [2] D. DE LEÓN-GORDILLO, C. M. MEDINA-RODRÍGUEZ, N. A. RODRÍGUEZ-OLIVARES, and J. A. SOTO-CAJIGA, "Diseño de un registrador de datos usando memorias nand flash basado en un microcontrolador de ultrabajo consumo," Revista de Innovación, vol. 1, no. 2, pp. 19–30, 2017.
- [3] O. Raso, P. Mlynek, R. Fajdiak, L. Pospichal, and P. Kubicek, "Implementation of elliptic curve diffie hellman in ultra-low power microcontroller," in 2015 38<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), July 2015, pp. 662–666.
- [4] H. Kim, M.-K. Lee, D. K. Kim, S.-K. Chung, and K. Chung, "Design and implementation of crypto co-processor and its application to security systems," in CIS, 2005.

[5] R. V. KSHIRSAGAR1 and M. V. VYAWAHARE, "Vlsi implementation of high throughput pipelined architecture for aes algorithm," IJVDCS, vol. 3, no. 8, pp. 1224–1228, 2015.

[6] Y. A. Nasser, M. A. Bazzoun, and S. Abdul-Nabi, "Aes algorithm implementation for a simple low cost portable 8-bit microcontroller," in 2016 Sixth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC), April 2016, pp. 203–207.

## **5. Biografías**

R. García-Hernández nació en Oaxaca, México. Tiene un grado de licenciatura en Ingeniería en Computación por la Universidad del Istmo, Oaxaca, México, obtenido en 2013. Sus intereses actuales en investigación incluyen Seguridad de la Información, Cómputo reconfigurable, Cómputo de Alto Rendimiento, Sistemas Embebidos y Códigos de Corrección de Errores.

# Método para remover evidencia del origen de la fotografía digital

L. Betanzos<sup>a</sup>, M. Cedillo-Hernández<sup>b</sup>, M. Nakano-Miyatake<sup>c</sup>, H. Pérez-Meana<sup>d</sup>

Instituto Politécnico Nacional, ESIME Culhuacán, SEPI,

<sup>a</sup> [Leonelbetanzos@gmail.com](mailto:Leonelbetanzos@gmail.com), <sup>b</sup> [mcedilloh@ipn.mx](mailto:mcedilloh@ipn.mx), <sup>c</sup> [mnakano@ipn.mx](mailto:mnakano@ipn.mx), <sup>d</sup> [hmperez@ipn.mx](mailto:hmperez@ipn.mx)

**Resumen**— Usando técnica de forense digital para fotografías, desde las imágenes digitales se puede extraer el patrón de huella de la cámara que uso sus capturas. Aunque la huella es una señal de baja potencia, es considerablemente robusta a varios procesamientos de imágenes, tales como compresión, escalamiento, recorte y ediciones. Este puede ser una amenaza para fotógrafos y activistas, ya que, desde sus fotografías publicadas en la red abierta, se puede llegar al dueño de la cámara y recibir algún acto de represaría por parte de autoridades o inclusive de grupos delictivos. Este artículo propone un método para anonimizar cualquier fotografía tomada por una cámara, modificando los segmentos importantes de metadatos que se puede ligar con una cámara y desincronizando el patrón de huella de la cámara usando el algoritmo de *Seam Carving*. Los resultados experimentales muestran efectividad del método propuesto usando varias fotografías tomadas por distintas cámaras.

**Palabras clave.** Foto-Respuesta No Uniforme, Meta datos, *Seam Carving*, Identificación de cámara, Pico de Correlación de Energía

## 1. Introducción

El desarrollo tecnológico ha traído consigo nuevas formas de expresión, tal es el caso de la fotografía digital y con esto una serie de técnicas capaces de evidenciar el origen de una fotografía con el fin de obtener información determinante sobre el dispositivo utilizado. Debido a este avance, incluso es posible usar una fotografía digital como prueba dentro de un proceso legal.

Para esto existen dos métodos: Metadatos y la huella de la cámara, donde el primero trata de obtener la mayor información alojada dentro de la fotografía [1], como ejemplo de esto el modelo y marca de cámara, hora y fecha, e incluso las coordenadas de la ubicación exacta del lugar donde se tomó [2], a su vez el segundo método considerado muy eficiente a la hora de ligar una cámara, esta huella se basa en un patrón de ruido generado por imperfecciones en la fabricación del sensor de la cámara por lo que es único en cada dispositivo fotográfico [3].

Sin embargo, estas técnicas amenazan también la integridad de personas que basan su trabajo en evidenciar, denunciar o exponer actos delictivos o de corrupción. Tal es el caso de reporteros, defensores de derechos humanos y activistas [4]. El objetivo de este artículo es desarrollar un método eficiente de anonimizar o eliminar el origen de una fotografía que permita proteger a este grupo de personas contra cualquier acto de represalia [4].

El trabajo y la investigación constantes han ayudado a entender mejor los puntos fuertes de estos métodos, un ejemplo de ello son los intentos por eliminar la huella que por ser tan robusta es capaz de soportar procesos como la compresión, el escalamiento, la rotación, la impresión e incluso el escaneo, sin sufrir alteración.

Nuestro método se propone a eliminar cualquier evidencia que ponga en peligro a los grupos ya descritos, este se basa en eliminar cualquier información contenida en los metadatos, el algoritmo de *Seam Carving* es una técnica recientemente desarrollada para el escalamiento aleatorio de una imagen usando hilos de energía verticales y horizontales con el fin de eliminar partes sin afectar el contenido y así cambiar el tamaño de la misma [5], debido a esto es posible eliminar eficientemente la huella pues esto provoca la pérdida de sincronización entre la huella de la cámara original y la huella de la fotografía, los resultados experimentales muestran la eficacia del método.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 describe el método propuesto, la sección 3 proporciona los resultados experimentales y su análisis, finalmente en la sección 4, se concluye el artículo indicando los alcances y limitaciones de este método.

## 2. Marco Teórico

El método propuesto usa tres algoritmos para operar y averiguar su funcionamiento. El primer algoritmo es la extracción de la huella de la cámara, la cual se usa para averiguar el funcionamiento del método. Ya que, si el método propuesto funciona correctamente, la huella de la cámara se ha eliminado suficientemente de la fotografía bajo análisis, y la anonimidad de la fotografía ha sido conseguida. El segundo algoritmo y tercer algoritmo son *Seam Carving* y la modificación de los Metadatos, los cuales son partes medulares de nuestro método propuesto. En esta sección, se describe detalladamente los dos primeros algoritmos y el concepto de Metadatos.

### A. Extracción de la huella de la cámara

La foto respuesta no uniforme (PRNU por su sigla en inglés) de una cámara es un patrón débil de ruido presente en cada imagen tomada, esta señal es asociada a una huella que identifica a una cámara específica, su estimación precisa es

primordial para la correcta identificación del origen de la fotografía. La fotografía tomada  $I$  se puede definir de la siguiente manera:

$$I = I^0 + I^0K + \Theta \quad (1)$$

donde  $K$  es la señal de foto respuesta no uniforme que queremos estimar,  $I^0$  es la señal sin ruido y  $\Theta$  es ruido aditivo. Estas señales al no ser conocidas la única señal disponible es la señal de salida  $I$  de la cámara, la cual es la fotografía tomada y almacenada. Estimando la imagen sin ruido  $I^0$  a partir de aplicar un filtro de eliminación de ruido ideal  $F(I)$ , [6] se obtendrá  $W$ , ruido residual, restando la imagen sin ruido a la imagen original.

$$W = I - F(I) = I - \hat{I}^0 \quad (2)$$

Al sustraer  $\hat{I}^0$  de ambos lados obtenemos:

$$\begin{aligned} I &= I^0 + I^0K + \Theta, \\ I - \hat{I}^0 &= I^0 + I^0K - \hat{I}^0 + \Theta, \\ W &= I^0 + I^0K - \hat{I}^0 + \Theta + (IK - IK). \end{aligned} \quad (3)$$

Al reescribir obtenemos:

$$W = IK + I^0 - \hat{I}^0 + (I^0 - I) \cdot K + \Theta. \quad (4)$$

$I^0 - \hat{I}^0$  es el error de estimación de imagen sin ruido y el término  $(I^0 - I) \cdot K$  es la afectación de ruido residual por el patrón de foto respuesta no uniforme  $K$ . Al simplificar esta ecuación obtenemos:

$$W = IK + \Xi \quad (5)$$

Dado que el factor  $K$  debe ser una constante para todo el conjunto de  $N$  imágenes tomadas por una cámara, podemos reescribir esta ecuación como:

$$W_j = I_jK + \Xi_j, \quad j = 1, \dots, N, \quad (6)$$

donde  $I_j, \Xi_j$  y  $W_j$  son la  $j$ -ésima imagen, su término de ruido y el ruido residual obtenido por  $W_j = I_j - \hat{I}_j^0$ ,  $N$  es numero total de las imágenes que usan para obtener el factor  $K$  de la cámara.

A partir de esta ecuación obtenemos la estimación del factor  $K$  por el algoritmo de máxima verosimilitud:

$$\hat{K} = \frac{\sum_{j=1}^N W_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j^2} \quad (7)$$

Esta ecuación indica que usando  $N$  imágenes tomadas por una cámara y estimando el ruido residual  $W$  de cada imagen aplicando filtro de eliminación de ruido, se puede estimar el ruido de foto respuesta no uniforme  $\hat{K}$  [3].

### B. Seam Carving

El método de *Seam Carving* consiste en generar hilos de energía, estos pueden ser horizontales o verticales a lo largo de

la imagen con el fin de eliminarlos o duplicarlos, el criterio de selección depende de la aplicación, para este caso se aplicó el escalamiento. Tabla I muestra principales aplicaciones de método de *Seam Carving* y criterios de selección de hilos [5].

TABLA I. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE HILOS

Aplicación	Criterios de selección
Escalamiento	Hilos con menor energía
Remoción de objeto	Hilos se trazan dentro del objeto
Enfatizar objeto	Hilos con menor energía, que no se trazan en el objeto.

Para generar hilos, es necesario obtener energía la cual podemos obtener usando gradiente como se muestra por (8)

$$e(\mathbf{I}) = \left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{I}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}\right)^2 \quad (8)$$

donde  $\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{I}$  es el gradiente de la dirección X, y  $\frac{\partial}{\partial y} \mathbf{I}$  es el gradiente de la dirección Y. Ambas gradientes son usadas en todas las aplicaciones de *Seam Carving*. Según sea el caso podemos obtener hilos verticales u horizontales los cuales se generan de la siguiente forma:

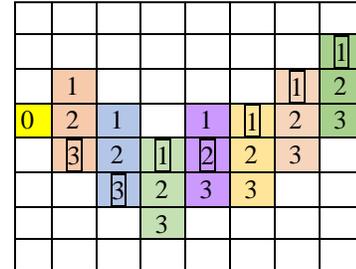


Fig 1 Generación de hilo horizontal

El bloque amarillo 0 es el pixel extremo izquierdo, a partir de este podemos trazar a uno de los tres posibles pixeles representados a la derecha con los tres bloques representados con los números 1,2,3, cada uno de estos pixeles tendrá tres opciones de trazo a su derecha hasta llegar al pixel derecho extremo, de la misma forma aplica para los hilos verticales, ambos pueden expresarse matemáticamente de la siguiente forma:

Los hilos verticales e hilos horizontales se pueden expresar como

$$S^x = \{(i, x(i))\}_{i=1}^n \quad \text{s.t. } \forall i, |x(i) - x(i-1)| \leq 1 \quad (9)$$

$$S^y = \{(y(j), j)\}_{j=1}^m \quad \text{s.t. } \forall j, |y(j) - y(j-1)| \leq 1 \quad (10)$$

donde  $n$  es el número de renglón de la imagen, y  $(i, x(i))$  es la posición del píxel que forma un hilo del  $i$ -ésima renglón,  $x(i)$  es la posición del  $i$ -ésima renglón.

El hilo con menor energía se puede escribir como:

$$S^* = \min_s E(I_s) = \sum_{i=1}^n e(I(s_i)) \quad (11)$$

Esta ecuación indica la selección de todos los hilos con menor energía desde todos los hilos existentes.

La mínima energía acumulada  $M$  para todos los posibles pasos de los hilos verticales se puede expresar:

$$M_v(i, j) = e(i, j) + \min(M_v(i-1, j-1), M_v(i-1, j), M_v(i-1, j+1)) \quad (12)$$

Para los hilos horizontales la energía mínima acumulada es:

$$M_h(i, j) = e(i, j) + \min(M_h(i-1, j-1), M_h(i, j-1), M_h(i+1, j-1)) \quad (13)$$

La selección del hilo horizontal con menos energía se realiza desde el mínimo valor de  $M$  en los pixeles del extremo derecho como se muestra en la Fig. 2. La energía acumulada más pequeña es "13" por lo tanto existen tres posibles hilos con la energía acumulada más pequeña:

12	16	4	11	13	15	17	14
8	2	11	9	12	15	13	16
2	5	6	8	10	10	16	18
3	4	7	7	9	13	11	13
3	4	5	7	10	10	12	14
2	5	7	10	13	12	14	13
2	3	6	7	9	10	13	13
7	7	6	8	8	10	11	14

Fig. 2 Un ejemplo de mínima energía acumulada  $M$  para los hilos horizontales, y la selección de un hilo con menor energía (letras rojas).

La selección de un píxel dentro de los tres pixeles con la mínima energía acumulada puede ser aleatoria. En este caso se seleccionó el píxel del 6to renglón. El trazo de mínima energía se realiza hacia la izquierda hasta llegar al primer píxel. Para el caso de un hilo vertical la operación es exactamente la misma, la cual empieza desde abajo hacia arriba. La Fig.3 muestra un ejemplo de selección de hilo vertical mostrado con letras rojas.

12	8	2	7	4	3	2	1
16	2	11	7	7	7	4	4
4	5	6	9	10	8	10	11
7	6	9	8	10	12	9	12
9	8	7	10	11	10	11	12
10	10	11	12	16	13	14	12
12	11	13	12	14	15	15	14
18	16	14	14	13	16	15	18

Fig. 3 Ejemplo de mínima energía acumulada  $M$  para los hilos verticales.

### C. Metadatos

Los metadatos para una imagen digital son los datos almacenados dentro de la imagen que permiten identificar información relacionada a la marca, modelo de la cámara, configuración de la cámara, fecha, hora, coordenadas, GPS, entre otros, estos datos comprimidos se almacenan de conformidad con el formato JPEG DCT especificado en ISO/IEC 10918-1 [7].

SOI	Inicio de imagen
APP1	Marcador de aplicación (Segmento 1)
APP2	Marcador de aplicación (Segmento 2)
DQT	Tabla de cuantificación
DHT	Tabla Huffman
DRI	Intervalo de reinicio
SOF	encabezado
SOS	Encabezado de escaneo
	Datos comprimidos
EOI	Final de la imagen

(a)

Marcador APP1
Longitud APP1
Código de identificación EXIF
Cabecera TIFF
IFD 0
Valor IFD 0
1er IFD
Valor 1er IFD
Dato de imagen 1er IFD

(b)

Fig. 4 Estructura básica de archivos de datos comprimidos. (a) Segmentos principales de metadatos de archivo Exif, (b) Contenidos de APP1.

TABLA II. Segmentos principales de Metadatos y sus significados

Segmento	Significados
SOI	Marca el inicio del segmento de los datos comprimidos en una imagen digital
APP1	Muestra una estructura aproximada de los datos EXIF
APP2	Segmentos de archivo en su mayoría Flashpix.
DQT	Matriz de cuantificación que usa para almacenar fotografía en forma comprimida. Dos matrices para fotografía principal y dos matrices para fotografía de miniatura
DHT	Tabla de Huffman para compresión JPEG
DRI	Marcador opcional que define la interoperabilidad de marcadores para muestreo de color
SOF	Dimensiones de la fotografía y componentes de luminancia y cromas
SOS	Componentes para seleccionar la tabla de Huffman y los valores YCbCr a utilizar
EOI	Indica el final de los datos de la fotografía

De la fig. 4 podemos resaltar el contenido de los segmentos más importantes de metadatos, los cuales están resumidos en la tabla II.

El segmento APP1 esta subdividido en 9 segmentos iniciando en el segmento SOI que indica el inicio del segmento formado por el prefijo FF y el código identificador de APP1 (E1), como se muestra Fig.4(b). El siguiente campo es la longitud APP1

que indica el tamaño del segmento, código de identificación EXIF que determina el formato de los campos.

La información sobre la cámara mencionada anteriormente está almacenada en esta región APP1 y las matrices de cuantificación para compresión de fotografía principal y la fotografía miniatura están almacenada en la región DQT (Fig.4 (a)). La información y los datos almacenados en estos dos regiones son directamente relacionados con el modelo de cámara, por lo tanto modificaciones de estas regiones de metadatos puede desligar las fotografías de su cámara.

### 3. Método propuesto

El diagrama a bloque del método propuesto está dado en Fig. 5.



Fig. 5 Diagrama a bloque del método propuesto

El método propuesto anonimiza la imagen de la siguiente forma:

1.- Algunos campos de metadatos de la imagen original se modifican para desligar la información relacionada con la cámara de la imagen. Los metadatos que se modifican son software de la cámara y modelo, ubicación GPS, fecha y hora de captura en el campo APP1, y las matrices de cuantificación en el campo DQT.

2.- Se aplica la técnica *Seam Carving* a la imagen original. El número de hilos a modificar debe ser dentro del límite donde la imagen no se ve afectada por defectos visuales. Este proceso elimina aleatoriamente la huella de la cámara desde la imagen, provocando desincronización en el proceso forense basado en la foto respuesta no uniforme.

Una vez se aplica el método propuesta a la imagen original para generar una imagen anonimizada, se aplica el método de identificación de cámara basado en la foto respuesta no uniforme para averiguar si la imagen generada ya no contiene la huella de la cámara. El método forense que determina la cámara (el origen de fotografía) desde la imagen presentada se muestra en la Fig. 6.

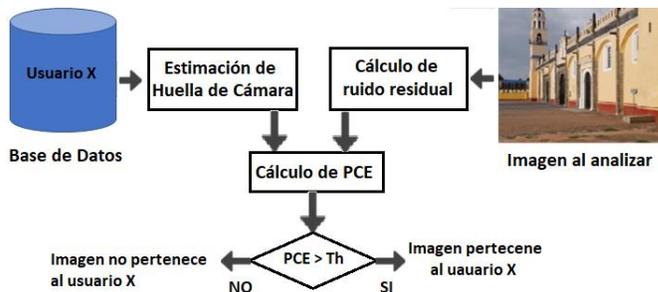


Fig. 6 Método de identificación de cámara

Los procesos de forense para ligar una cámara específica con la imagen de cuestión son los siguientes:

1.- Estimar la huella de la cámara  $\hat{K}$  usando varias fotografías de un usuario (un fotógrafo o una activista identificado, etc.). Este proceso se llevará a cabo por el proceso explicado en la sección 2A.

2.- Obtener la huella de la cámara de la imagen de cuestión. Este proceso se realiza estimando el ruido residual.

$$W = \hat{I} - F(I) \quad (14)$$

donde  $\hat{I}$  es la imagen de cuestión, y  $F$  es filtro para eliminación de ruido [6], y  $W$  es ruido residual.

3.- Obtener energía pico de correlación (PCE por su sigla en inglés) entre huella de una cámara específica y el ruido residual obtenido de la imagen en cuestión. El PCE se calcula de la siguiente manera:

$$PCE = \frac{\rho(s_{peak}; X, Y)^2}{\frac{1}{mn - |K|} \sum_{S \in K} \rho(S; X, Y)^2} \quad (15)$$

Donde

$$s_{peak} = \arg \max_{s_1, s_2} \rho(s_1, s_2; X, Y). \quad (16)$$

$$\rho(s_1, s_2; X, Y) = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n (X[k, l] - \bar{X})(Y[k + s_1, l + s_2] - \bar{Y})}{\|X - \bar{X}\| \|Y - \bar{Y}\|}. \quad (17)$$

4.- El valor de PCE se compara con el valor umbral ( $Th$ ) predeterminado. Si el valor de PCE es menor que el valor umbral  $Th$ , la imagen en cuestión no contiene la huella de la cámara usada para tomar otras imágenes del usuario y se puede concluir que la imagen generada por el método propuesto es anonimizada satisfactoriamente.

El método de forense presentado por la Fig. 6 se usa para obtener un equilibrio entre el grado de anonimización y la calidad visual de la imagen obtenida del método propuesto mostrado por la Fig. 5.

#### 4. Resultados

TABLA III. IMÁGENES Y CAMARAS UTILIZADAS

No	Cantidad	Cámara
1	80 imágenes	Canon EOS 6D
2	37 imágenes	Canon EOS 5D
3	77 imágenes	Samsung Galaxy Note 8
4	50 imágenes	Samsung Galaxy S5
5	100 imágenes	Samsung Galaxy S6 plus
6	55 imágenes	Samsung Galaxy S7
7	70 imágenes	Apple iPhone 5s
8	100 imágenes	Apple iPhone 6
9	88 imágenes	Apple iPhone 6s
10	70 imágenes	Apple iPhone 7

Para la obtención de los resultados se ha hecho uso de la página web <http://flickr.com> de donde se han conseguido las fotografías para evaluar el método propuesto. La Tabla III muestra la descripción de imágenes y las cámaras usadas de 10 usuarios seleccionadas aleatoriamente, aunque se realizó la evaluación con más de 50 usuarios diferentes.

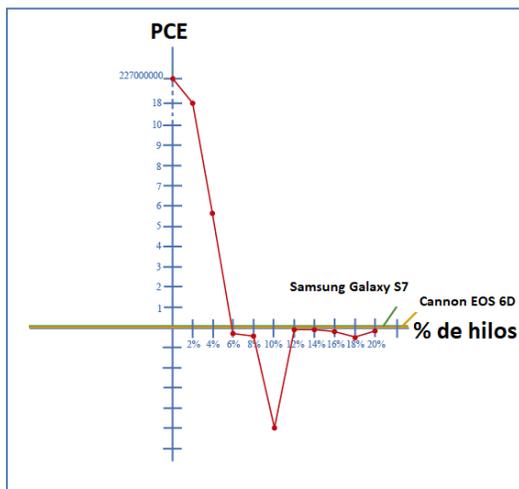


Fig. 7 Relación entre los porcentajes de hilos comprometidos para generar imágenes anonimizadas y el valor de PCE. (Canon EOS 5D)

El grado de anonimización por el método propuesta depende directamente del número de hilos que manipulan en el algoritmo de *Seam Carving*. La Fig. 7 muestra relación entre el número de hilos y el valor de PCE obtenido por (13). La cámara usada para esta prueba es una Canon EOS 5D. Los valores PCE ( $\approx 0$ ) entre la fotografía original tomada por esta cámara y la fotografía tomada por otras cámaras, en este caso Samsung Galaxy S7 y Canon EOS 6D, son agregados. Esto quiere decir que los valores de PCE menor que el valor ‘0’ garantiza la anonimización de la imagen obtenida por el método propuesto. En este caso, el porcentaje de hilos respecto al número total de hilos existentes es mayor que 6% garantiza la anonimización de la fotografía, removiendo la huella de la cámara completamente.

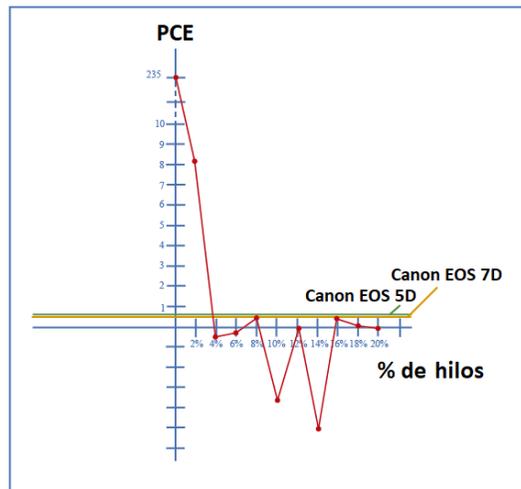


Fig. 8 Relación entre los porcentajes de hilos comprometidos para generar imágenes anonimizadas y el valor de PCE. (Canon EOS 6D)

El mismo experimento aplicó a otras fotografías tomadas por diferentes cámaras para evaluar el método propuesto. Fig. 8 muestra relación entre los porcentajes de hilos comprometidos en el algoritmo de *Seam Carving* y los valores de PCE para una fotografía tomada por la cámara Canon EOS 6D. El valor umbral fue tomado como el valor de PCE entre fotografías tomadas por la cámara de interés y otras cámaras diferentes a estos. Como se puede observar de la figura, después de 6% de hilos comprometidos en el algoritmo de *Seam Carving*, la fotografía fue anonimizada, ya que no se puede determinar la cámara específica usando la estimación de huella basado en la foto respuesta no uniforme.

TABLA IV. LOS VALORES DE PCE ANTES y DESPUES DEL ALGORITMO PROPUESTO

Cámara	PCE	
	Fotografía Original	Fotografía Anonimizada con 6% de hilos comprometidos
1	235.3	Nulo
2	8155.3	Nulo
3	3600.5	Nulo
4	9412.7	Nulo
5	6161.0	0.0042
6	$3.6 \times 10^7$	0.001
7	549.0	Nulo
8	1527.7	Nulo
9	85.68	Nulo
10	2335.6	Nulo

Tabla IV muestra la comparación entre los valores de PCE de fotografías originales y los de fotografías anonimizadas por el algoritmo propuesto con 6% de hilos comprometidos. En la Tabla, el número de las cámaras corresponde con el número la Tabla III y “Nulo” significa que el valor de PCE es negativo, indicando que la correlación no existe. Esta tabla indica que el algoritmo propuesto anonimiza correctamente las fotografías tomadas por cualquier cámara.



Fig. 9 Imágenes originales e imágenes anonimizadas por el sistema propuesto. (a), (c) y (e) son imágenes originales y (b), (d) y (f) son imágenes anonimizadas.

Figura 9 muestra imágenes anonimizadas por el método propuesto junto con sus versiones originales. Los porcentajes de hilos horizontales y verticales comprometidos son 6% en Fig. 9(b), 10% en Fig. 9(d) y 6% en Fig. 9(f), respectivamente.

Como se puede observar de la Fig. 9, las imágenes generadas para eliminar las huellas de cámara no presentan ninguna distorsión visual y los contenidos de fotografías son muy claros respecto a sus originales.

## 5. Conclusiones

En este artículo se presentó un método para anonimizar fotografía digital, eliminando las evidencias existentes en las fotografías que se pueden relacionar con una cámara específica que es el origen de las fotografías. El método consiste en la modificación de los segmentos relevantes de metadatos de fotografía y desincronización del patrón de huella de la cámara usando el algoritmo de *Seam Carving*.

Para evaluar el método propuesto, se realizó varios experimentos usando más de 400 fotografías tomadas por 50 cámaras, incluyendo cámaras de los mismos modelos. Los resultados experimentales muestran que cuando más de 6% de los hilos verticales y horizontales son involucrados en el algoritmo de *Seam Carving*, el patrón de huella de la cámara de la fotografía se desincroniza completamente y se logra la

anonimización de la fotografía. Las fotografías anonimizadas presentan buena calidad visual respecto a sus originales.

El trabajo futuro es realizar una evaluación estadística del método propuesto y determinar un valor umbral único para el método propuesto.

## 6. Referencias

- [1] H. Farid, Photo Forensics, The MIT Press, 2016.
- [2] J. Tesic, "Metadata Practices for Consumer Photos", IEEE Multimedia Magazine, vol. 12, no. 3, pp. 86-92, 2005
- [3] J. Lukas, J. Fridrich y M. Goljan, "Digital camera identification from sensor noise", IEEE Trans. on Information Security and Forensics, vol 1, no. 2, pp. 205-214, 2006.
- [4] S. Nagaraja, P. Schaffé y D. Aouada, "Who click there! Anonymising the photographer in a camera saturated society", in proc. of ACM conference WPES 2011, pp. 13-22.
- [5] S. Avidan y A. Shamir, "Seam Carving for content-aware image resizing", ACM Trans. on Graphics, vol. 26, no. 3, Articulo 10, 2007.
- [6] K. Dabov, A. Foi, V. Katkovnik y K. Egiazarian, "Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering", IEEE Trans. on Image Processing, vol. 16, no. 8, pp.2080-2095, Ago. 2007.
- [7] Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2. (abril 2002). <https://www.exif.org/Exif2-2.pdf>, último acceso 7 de Julio 2018.

## 7. Biografías

**Leonel Betanzos** recibió el grado de Ingeniero en Sistemas Computacionales en el año 2015, Actualmente cursa la maestría en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Sus principales áreas de interés son el desarrollo de software, seguridad de la información y forense en imágenes.

**Manuel Cedillo-Hernández** recibió el grado de Ingeniero en Computación, Maestro en Ciencias de Ingeniería en Microelectrónica y el Doctorado en Comunicaciones y Electrónica en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) en los años 2003, 2006 y 2011. Se desempeñó como profesor de carrera en la UNAM en los años 2011 al 2015. A partir de 2016 es profesor-investigador en el IPN. Sus principales áreas de interés son el procesamiento de imagen y video, marcado de agua digital, desarrollo de software y áreas relacionadas.

**Mariko Nakano-Miyatake** recibió el grado de Ingeniero en matemáticas aplicadas, Maestro en Ingeniería en la Universidad de Electro-Comunicación, Tokio, Japón en los años 1983 y 1985. Ella recibió el grado de Doctorado en Ciencia de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) en el año 1998. Se desempeñó como profesora investigadora de la UAM desde el año 1993 hasta el año 1998. A partir del año 1997 hasta la fecha, ella es profesora investigadora del Instituto Politécnico Nacional. Sus principales áreas de interés son procesamiento de imágenes, seguridad informática y aprendizaje automático.

**Héctor Pérez-Meana** recibió el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica del The Tokyo Institute of Technology, en 1989. De 1989 a 1991, estuvo con Fujitsu Laboratories Ltd, Japón. En febrero 1997 a la fecha se unió a la ESIME del Instituto Politécnico Nacional, México. Ha publicado más de 200 artículos internacionales y dirigido 25 tesis doctorales entre otros logros académicos. Es Editor Asociado de la IEEE Latinamerica Transactions, Senior Member del IEEE, Miembro de la IEICE, del Sistema Nacional de Investigadores de México con Nivel III y de la Academia Mexicana de Ciencias.

# Discriminación de Grado de Humedad en Hojas Mediante Termografía Pulsada

A. Fragoso-Mandujano<sup>1,a</sup>, M. Pérez-Patricio<sup>1,b</sup>, H. Guerra-Crespo<sup>1,c</sup>, H. R. Hernández-de León<sup>1,d</sup>, S. Velázquez-Trujillo<sup>1,e</sup>, E. Simá<sup>2,f</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, <sup>2</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico  
<sup>a</sup>jose.fragoso@ituxtlagutierrez.edu.mx, <sup>b</sup>mperez@ittg.edu.mx, <sup>c</sup>hgcespo@hotmail.com, <sup>d</sup>hhernandezdo@ittg.edu.mx,  
<sup>e</sup>sabinovelazquez1@hotmail.com, <sup>f</sup>esima@cenidet.edu.mx,

**Resumen**—La deshidratación es uno de los procesos más comunes para propiciar la estabilidad de los productos. La estimación adecuada del nivel de humedad en productos deshidratados previene cambios físicos no deseados provocados por la falta de control en el proceso de deshidratación. Por lo tanto, el objetivo general de este estudio es demostrar que el análisis de imágenes obtenidas por termografía pulsada se puede utilizar para discriminar entre hojas frescas y hojas secas. En este artículo, se describe el diseño y construcción del sistema de adquisición de imágenes térmicas. Se colectaron dos muestras de Neem (*Azadirachta indica*), una de ellas se deshidrató en su totalidad mientras que la otra se mantuvo como objeto de control. Se obtuvo la curva de cinética térmica en cada una de las muestras. Los resultados demostraron la capacidad de la termografía pulsada para diferenciar una hoja hidratada de una deshidratada.

**Palabras clave.** Termografía pulsada, Deshidratación, Procesamiento de imágenes, Cinética de secado.

## 1. Introducción

El proceso de deshidratación consiste en la extracción de agua contenida en tejidos orgánicos. Las variables que intervienen directamente en este proceso son: la calidad y propiedades del producto; el tiempo de secado, el espesor del producto, la re-hidratación y, las condiciones climáticas locales, es decir, la temperatura del aire y humedad relativa. Esto convierte al proceso de deshidratación en un fenómeno complejo de varias variables. El uso inapropiado de estos parámetros durante el proceso de secado resulta en cambios no deseados en las propiedades del producto, como son: decoloración, pérdida de aroma, disminución de valores nutricionales y cambios físicos en apariencia y forma [1].

Partiendo de lo anterior, se observa un problema en el control de calidad de productos deshidratados, ya que durante años el control de calidad en la industria de productos deshidratados se determinó con el uso de métodos invasivos. Por ejemplo, a través de mediciones manuales con calibrador vernier, micrómetro, entre otros; la inspección se basa en la apariencia física y no en propiedades internas, además estas mediciones han demostrado ser inadecuadas debido a que el producto se encuentra en contacto directo con el instrumento de medición provocándole daño físico [2]. Más aún, se ha documentado que el control de calidad manual presenta su mayor deficiencia en la supervisión de líneas continuas de producción [3]. Considerando esto, en la literatura se han

propuesto métodos no destructivos de control de calidad, algunos mediante el uso de técnicas de visión por computadora (*Computer Vision System* ó *CVS*) aplicados a la inspección de frutas, vegetales y hojas [4]–[6]. Las técnicas de evaluación no destructivas (*Non-Destructive Evaluation* ó *NDE*) proveen una alternativa a la inspección manual de productos deshidratados con la integración de un dispositivo de adquisición de imágenes y una computadora [7].

Entre las diferentes técnicas de evaluación no destructivas, la termografía pulsada (*Pulsed Thermography* ó *PT*) es un proceso rápido de evaluación no destructiva la cual usa una luz de alta intensidad para calentar vía efecto fototérmico la superficie de una pieza de muestra [8]. Normalmente se usan flashes de corta duración, dependiendo de las propiedades térmicas del objeto y de la profundidad de interés, la evolución de la temperatura respecto al tiempo de la superficie es monitoreada por una cámara infrarroja (IR) con una computadora que cuantifica los cambios del material [9], los defectos internos reducen la conducción de calor, disminuyendo la tasa de enfriamiento comparado con las regiones no dañadas. El campo de temperatura transitorio  $T(z,t)$  en PT se obtiene de la solución de la Ecuación (1) de conducción de calor unidimensional no homogénea (1D) [10].

$$\frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = -\frac{g(z,t)}{k}, t > 0 \quad (1)$$

Donde  $\alpha = k/\rho c$  es la difusividad térmica ( $m^2/s$ ), con  $k$  la conductividad térmica (W/mK),  $\rho$  la densidad ( $kg/m^3$ ) y  $c$  el calor específico (J/kg K),  $g(z,t) = Q_0 \delta(z - z_0) \delta(t - t_0)$  es el impulso externo de calor localizado en  $z_0 = 0$  y el tiempo de excitación  $t_0 = 0$ , con  $Q_0$  la intensidad de la fuente por unidad de longitud ( $Jm^{-1}$ ) y  $\delta(z - z_0) \delta(t - t_0)$  delta Dirac en espacio y tiempo, respectivamente. Se consideran que existen cambios locales en las propiedades térmicas relacionados con la pérdida de humedad y cambio de densidad del producto. Los cambios en los niveles de humedad y densidad del producto se puede identificar midiendo la

distribución de la temperatura superficial en el proceso de calentamiento y enfriamiento. El agua que se encuentra en espacios intercelulares es responsable del aumento de densidad, del aumento de su capacidad térmica y la disminución de la conductividad térmica [11]. Por lo tanto, teóricamente, al disminuir la humedad del producto disminuye la densidad del mismo, en consecuencia la difusividad aumenta.

En la industria alimentaria la PT es particularmente adecuada en presencia de huecos de aire superficiales o defectos internos [12]. Por ejemplo: en la detección de tejidos dañados en manzanas y arándanos [11], [13], [14], en la identificación de materia extraña en algodón [15], [16], en el control de calidad en alimentos [17], en la medición de humedad superficial en cítricos [18], en la discriminación de grados de madurez de tomates y manzanas [19], entre otros. Sin embargo, hasta el momento no se encontraron estudios que relacionen directamente el grado de deshidratación en productos orgánicos (frutas, vegetales u hojas) con la técnica de termografía pulsada.

El objetivo general de este estudio es demostrar que el análisis de imágenes obtenidas por termografía pulsada se puede utilizar para discriminar entre hojas frescas y hojas secas. Los objetivos específicos: 1) desarrollar un sistema de adquisición de imágenes térmicas basado en termografía pulsada para recopilar una secuencia imágenes térmicas de hojas frescas y secas; 2) extraer la curva de cinética térmica de las muestras; 3) Comparar las curvas de enfriamiento respecto al tiempo de las hojas húmedas y secas.

## 2. Materiales y métodos

### A. Banco de adquisición de imágenes térmicas

Para facilitar el análisis térmico de las hojas, se construyó un banco de pruebas de termografía pulsada siguiendo el esquema mostrado en la Fig. 1, una computadora portátil (raspberry pi 3B+, Raspberry pi Foundation) con Python3 instalado como interfaz de operación. Los videos se colectaron por un módulo térmico radiométrico sin obturador (FLIR Lepton 2.5, FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA) montada sobre un marco de 8cm de largo por 8cm de altura y 8cm de profundidad hecho de foamboard. El módulo FLIR Lepton tiene una resolución de 80x60 píxeles, un rango espectral de 8 - 14  $\mu\text{m}$  y una sensibilidad térmica de 0.050  $^{\circ}\text{C}$ . Un micro-servomotor con un cuerpo negro unido se activa para calibrar el módulo Lepton previo a cada experimento. Un foco incandescente tipo reflector de 75W (Concentra 75W, OSRAM, Alemania) con una abrazadera ajustable para montura provee la estimulación térmica. Como fondo de la

escena se eligió una pieza de vidrio cubierta de espuma de polietileno (La espuma de polietileno es un aislante térmico, por ello, minimiza el calentamiento debido al reflector y maximiza el contraste entre la muestra y el fondo). Una placa de relé (SunFounder, Shenzhen City, Guangdong Province, China) se usa para activar y desactivar el reflector con alta precisión.

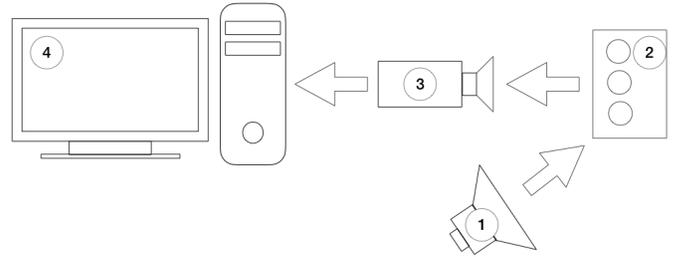


Fig. 1 Configuración general de experimentos en termografía activa: 1.Fuente de calor, 2. Espécimen, 3. Cámara infrarroja, 4. PC para mostrar datos, grabar y procesar

En términos generales, el sistema funciona de la siguiente manera: se abre el canal del módulo Lepton, se calibra y comienza la captura de imágenes, posteriormente se activa el servomotor dejando expuesta el lente del módulo, a continuación se activa el relevador y este a su vez enciende el reflector, posteriormente se desactiva el relevador con ello finaliza la estimulación térmica, el proceso finaliza al activar el servomotor y cubrir la lente y cerrar el canal del módulo, los tiempos de funcionamiento de cada canal se especifican mas adelante.

Se desarrolló un programa en lenguaje Python para operar de forma automática el sistema, el cual consiste en: activación y desactivación del reflector, activación y desactivación del servomotor, operación de la cámara térmica, y la gestión de memoria para almacenar videos. La Fig. 2 bosqueja el sistema de captura de imágenes térmicas.

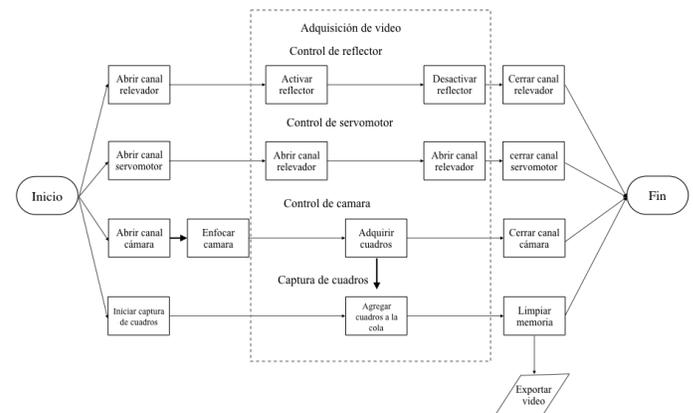


Fig. 2 Diagrama de flujo del sistema de adquisición de imágenes térmicas

## B. Preparación de las muestras

Para este estudio por disponibilidad en el TecNM/ITTG se seleccionaron hojas de Neem (*Azadirachta indica*). Las muestras se recolectaron en abril 2019. Se prepararon diez muestras, la cuales se almacenaron por 3 horas en bolsas selladas a baja temperatura para estabilizar su temperatura y humedad, se separaron en dos grupos, en el primero, cinco de las muestras se reservaron como muestras de control, en el segundo las hojas restantes se deshidrataron durante 8 horas a 50°C para asegurar la pérdida máxima de humedad, esto con la finalidad de comparar dos extremos posibles, el primero con una hoja totalmente hidratada y la segunda con una hoja totalmente deshidratada.

## C. Procesamiento

El procesamiento de la información se realizó en tres etapas: captura de imágenes Fig. 3(a), extracción de la región de interés Fig. 3(b), graficación de la curva de cinética térmica Fig. 3(c).

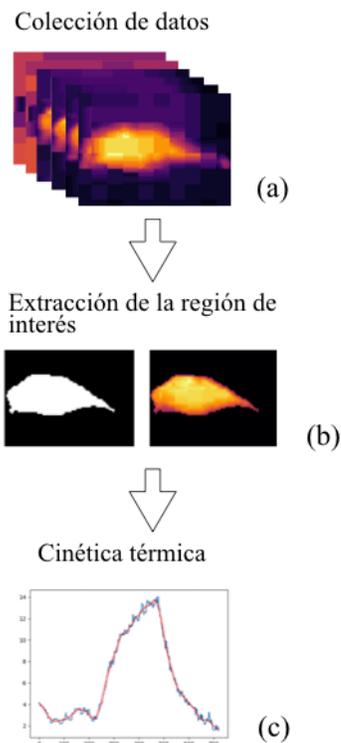


Fig. 3 Diagrama de procesamiento de información.

### C1. Captura de imágenes

Los vídeos fueron recopilados en un formato estricto con una duración total de 24s. Un segundo después de iniciar la grabación se activa el servomotor descubriendo el lente, en

paralelo se activa la lámpara de calor, a los 12s, se desactivan, para una duración total del pulso de 11s, a los 23s de iniciada la grabación se activa nuevamente el servomotor para cubrir el lente, con ello se tienen 11s de curva de enfriamiento, finaliza la grabación con un segundos adicional de captura de imágenes con la finalidad de evitar truncamiento involuntario de información. La captura de información de las muestras se realizó entrelazada: primero se capturo vídeo de la muestra de control (hojas frescas), seguida de la muestra del grupo de hojas deshidratadas, se obtuvo un vídeo por muestra, produciendo 10 vídeos en total, cada vídeo se capturo a 20 *fps*, dando un aproximado de 4,800 imágenes a procesar.

### C2. Extracción de la región de interés

El proceso de segmentación se realizó en lenguaje Python y la librería Scikit-image donde se creó una imagen de salida binaria a partir de una imagen en escala de grises que se extrajo del pico mas alto de temperatura, donde el nivel de transición dado por el parámetro  $p_1 = 25$ , dada la función de transformación (Ecuación(2).

$$q = \begin{cases} 0 & \text{para } p \leq p_1 \\ 255 & \text{para } > p_1 \end{cases} \quad (2)$$

La imagen binaria se multiplicó por cada cuadro en el vídeo para extraer solo los píxeles de la hoja, todos los píxeles del objeto se promedian juntos, produciendo un valor promedio por cada fotograma, la serie de valores que se obtuvieron se almacenaron en archivos CSV para su análisis.

### C3. Gráfica de curva de cinética térmica

Para cada grupo de hojas se obtuvieron cinco curvas de cinética térmica, una por cada muestra, para posteriormente obtener el promedio y graficar la evolución de el valor promedio de píxeles contra fotograma. El par de curvas resultantes del proceso anterior se aprecian en la Fig. 4.

## 3. Resultados y discusión

Con la metodología descrita se procesaron dos conjuntos de muestras, uno con un alto nivel de humedad y otra con un bajo nivel de humedad. Se graficó el promedio de temperaturas a lo largo del tiempo Fig. 3(c), la no uniformidad en el proceso de termografía pulsada induce ruido a la gráfica de cinética térmica, se usa un filtro tipo Savitzky-Golay para disminuir las fluctuaciones en las curvas. La Fig. 4 es el resultado de filtrar la señal de entrada.

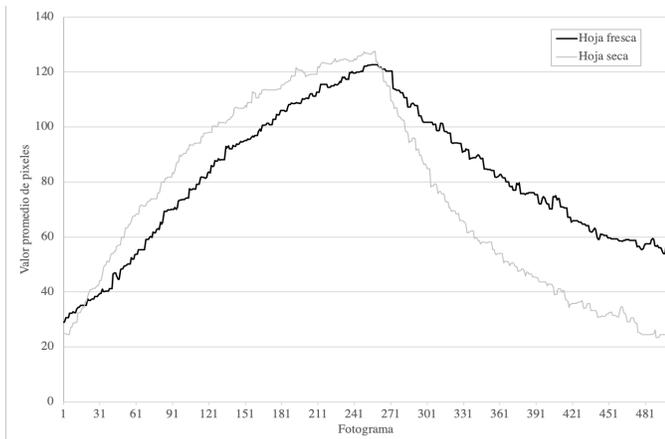


Fig. 4 Comparación del valor promedio de los píxeles respecto al fotograma en el proceso de termografía pulsada sin filtro

En la Fig. 5 se observa que en la zona con pendiente positiva, es decir, durante el proceso de calentamiento la hoja seca llega al pico de temperatura ligeramente antes que la hoja fresca, sin embargo, en la zona de enfriamiento (Fig. 6) se percibe diferencia significativa en el enfriamiento de las hojas. Con la finalidad de obtener un valor comparable entre las pendientes de enfriamiento se hizo coincidir una línea de tendencia lineal en cada una de las curvas respecto a su origen, la pendiente en la curva de enfriamiento de la hoja seca es un 65% mayor a la pendiente de curva de enfriamiento de la hoja fresca, dicha diferencia se puede tomar como una variable para discriminar la humedad en las muestras.

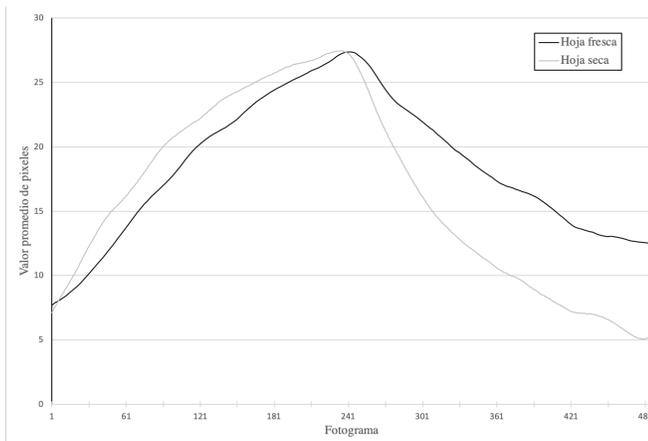


Fig. 5 Comparación del valor promedio de los píxeles respecto al fotograma en el proceso de calentamiento y enfriamiento

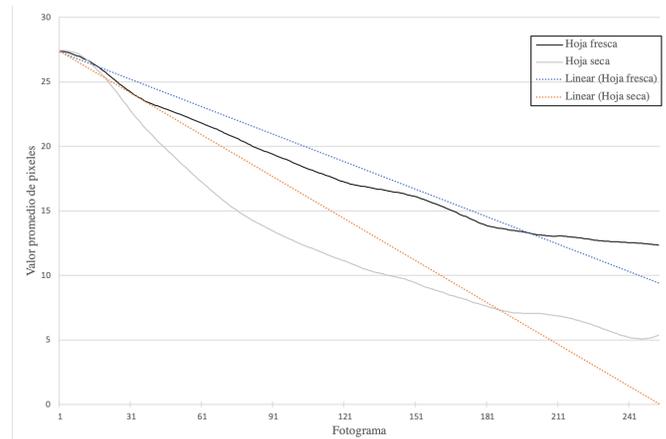


Fig. 6 Comparación del valor promedio de los píxeles respecto al fotograma en el proceso de enfriamiento y sus respectivas líneas de tendencia

## 5. Conclusiones

Se encontraron diferencias significativas entre hojas secas y hojas frescas en el proceso de enfriamiento, no se encontraron diferencias significativas en el proceso de calentamiento de las muestras, la temperatura superficial de las hojas secas se disipa un 65% más rápidamente durante el proceso de enfriamiento, esto concuerda con la ecuación de transferencia de calor de Newton y con el cambio en la difusividad térmica relacionado con la disminución en la densidad de las hojas durante el proceso de deshidratación. Los resultados que se presentan demuestran la capacidad de la termografía pulsada para detectar niveles de deshidratación en hojas. La termografía pulsada se puede considerar una técnica de detección viable.

## 6. Referencias

- [1] A. K. Babu, G. Kumaresan, V. A. A. Raj, and R. Velraj, "Review of leaf drying: Mechanism and influencing parameters, drying methods, nutrient preservation, and mathematical models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, no. March, pp. 536–556, 2018.
- [2] J. S. N. Narsaiah, K. Sharma, A. D. Singh, M. Bansal, and S. Kumar, "Quality parameters of mango and potential of non-destructive techniques for their measurement – a review Jha," *Mysore J Food Sci Technol*, vol. 47, no. 1, pp. 1–14, 2010.
- [3] L. Mayor and A. M. Sereno, "Modelling shrinkage during convective drying of food materials: A review," *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 373–386, 2004.
- [4] M. T. Habib, A. Majumder, A. Z. M. Jakaria, M. Akter, M. S. Uddin, and F. Ahmed, "Machine vision based papaya disease recognition," *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, pp. 0–9, 2018.
- [5] A. R. B. Tech, A. L. C. da Silva, L. A. Meira, M. E. de Oliveira, and L. E. T. Pereira, "Methods of image acquisition and software development for leaf area measurements in pastures," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 153, no. February, pp. 278–284, 2018.

- [6] S. Sabzi and J. I. Arribas, "A visible-range computer-vision system for automated, non-intrusive assessment of the pH value in Thomson oranges," *Comput. Ind.*, vol. 99, pp. 69–82, 2018.
- [7] L. Ferna, C. Castellero, and J. M. Aguilera, "An application of image analysis to dehydration of apple discs," *J. Food Eng.* 67, vol. 67, pp. 185–193, 2005.
- [8] V. P. Vavilov and D. D. Burleigh, "Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing," *NDT E Int.*, vol. 73, pp. 28–52, 2015.
- [9] D. P. Almond and S. G. Pickering, "An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, no. 9, 2012.
- [10] J. C. Carslaw, H.S.; Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. Oxford, UK, 1959.
- [11] P. Baranowski, J. Lipecki, W. Mazurek, and R. T. Walczak, "Detection of watercore in 'Gloster' apples using thermography," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 47, no. 3, pp. 358–366, 2008.
- [12] Z. Wang, G. Tian, M. Meo, and F. Ciampa, "Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography," *NDT E Int.*, vol. 99, pp. 93–104, 2018.
- [13] P. Baranowski, W. Mazurek, B. Witkowska-Walczak, and C. Sławiński, "Detection of early apple bruises using pulsed-phase thermography," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 91–100, 2009.
- [14] J. Kuzy, Y. Jiang, and C. Li, "Blueberry bruise detection by pulsed thermographic imaging," *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 136, no. August 2017, pp. 166–177, 2018.
- [15] G. Ginesu, D. D. Giusto, and P. Meinlschmidt, "Detection of Foreign Bodies in Food by Thermal Image Processing," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 2, pp. 480–490, 2004.
- [16] J. Kuzy and C. Li, "A pulsed thermographic imaging system for detection and identification of cotton foreign matter," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 3, pp. 1–15, 2017.
- [17] A. A. Gowen, B. K. Tiwari, P. J. Cullen, K. McDonnell, and C. P. O'Donnell, "Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment," *Trends in Food Science and Technology*, vol. 21, no. 4. Elsevier Ltd, Dublin 1, Ireland, pp. 190–200, 2010.
- [18] P. J. Fito, M. D. Ortolá, R. De los Reyes, P. Fito, and E. De los Reyes, "Control of citrus surface drying by image analysis of infrared thermography," *J. Food Eng.*, vol. 61, no. 3, pp. 287–290, 2004.
- [19] S. Offermann et al., "Infrared transient thermography for non-contact, nondestructive inspection of whole and dissected apples and of cherry tomatoes at different maturity stages," *Instrum. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 2–3, pp. 145–155, 1998.

## 6. Biografías

José Armando Fragoso Mandujano, Graduado como ingeniero mecánico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Maestro en ciencias en ingeniería mecánica, con especialidad en diseño mecánico, por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico. Actualmente estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, con proyecto dirigido al procesamiento de imágenes.

Madain Pérez Patricio es graduado como Doctor en Ciencias en Automatización y Computación Industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador y Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su área de interés incluye visión por computadora y computación reconfigurables.

Héctor Guerra Crespo es profesor en el área de Ingeniería en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y en el área de Licenciatura en Sistemas Computacionales de la Universidad Autónoma de Chiapas, en ambas desde 1995. Es Doctor en Sistemas Computacionales por la Universidad del Sur, en 2011. Maestro en Administración por el I.T. de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Chiapas, en 2000 e Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Mérida, Yucatán en 1994. Su especialidad en docencia son las materias de Programación, Estructura de Datos, Teoría Matemática de la Computación, Compiladores y Graficación.

Héctor Ricardo Hernández de León es graduado como Ingeniero En Electrónica por el Instituto Politécnico Nacional, Doctorado en Ciencias en Sistemas Automatizados por el Instituto de Ciencias Aplicadas INSA-Toulouse-Francia. Actualmente investigador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica y la Carrera de Ingeniería Electrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su área de interés es Control Inteligente y diagnóstico de fallas en plantas de agua potable.

Sabino Velázquez Trujillo, Doctor en Ciencias en Ingeniería en el area de Procesos de Manufactura (2009) por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, Querétaro, Quer., México. Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial (1995) por el Instituto Tecnológico de Orizaba, México. Ingeniero Industrial en Producción por el Instituto Tecnológico de Tuxtla, México.

Efraín Simá Moo es originario del estado de Campeche, egresado de la carrera de Ing. Mecánica, por el Instituto Tecnológico de Mérida, en 1995. Estudió la Maestría en Ciencia en Ingeniería Mecánica y el Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica, en el centro nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (cenidet) y se tituló en 1999 y 2009, respectivamente. Su área de especialización es: Transferencia de Calor y Masa, Energía Solar, Diseño y Construcción de Secadores. Maneja los siguientes software: Matlab, Fluent, Labview, Design builder, Energy Plus, Solid Works, entre otros. Actualmente, es profesor investigador de tiempo completo del departamento de Ingeniería Mecánica del cenidet y asesor del Instituto de Ingenieros de Morelos.

# Procedimiento de Muestreo-Reconstrucción de realizaciones de la suma de dos Procesos Gaussianos

V. Kazakov<sup>1,a</sup>, Y. Goritskiy<sup>2,b</sup>, F. Mendoza<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Ingeniería Eléctrica  
Instituto Energético de Moscú (Universidad Técnica)

<sup>a</sup>vkaz41@hotmail.com, <sup>b</sup>goritskiy@yandex.ru, <sup>c</sup>fcm2709@gmail.com

**Resumen**— Aplicando el método de la Regla de la Esperanza matemática condicional, la descripción estadística del Procedimiento de Muestreo Reconstrucción de la suma dos procesos aleatorios es investigado. Considerando dos variantes cuando procesos sumados son dependientes e independientes. Las funciones de error de reconstrucción están investigadas detalladamente en tres ejemplos con procesos markovianos y no markovianos. En todos los casos se muestra que la dependencia estadística entre los procesos sumados disminuye error de reconstrucción.

**Palabras clave.** Función de error de reconstrucción, intervalo de muestreo, número de muestras, filtro pasa-baja, procedimiento de muestreo reconstrucción.

## 1. Introducción

El teorema de Balakrishnan (TB) [1] es válido para procesos estacionarios aleatorios con un espectro de potencia  $S(\omega)$  limitado en banda a una frecuencia  $\omega_b$ . La función básica es la misma para todas sus muestras. El intervalo de muestreo es periódico  $\Delta T$  se determina por la fórmula de Nyquist  $\Delta T = \pi/\omega_b$ . Con un número  $N$  infinito de muestras, el error de reconstrucción es cero para todos los tipos de procesos aleatorios. En TB, un proceso aleatorio está definido por un solo dígito  $\omega_b$ . Las características principales del Procedimiento de Muestreo-Reconstrucción (PMR), la función de reconstrucción y la función de error de reconstrucción, no dependen de la descripción estadística de un proceso aleatorio: la función de densidad de probabilidad, la función de covarianza, el espectro de potencia en un intervalo  $\omega \leq \omega_b$ . Sobre la base de la teoría de cumulantes (ver, por ejemplo, [2], [3]), se puede argumentar que TB es válida solo para los procesos gaussianos. Las condiciones de TB son demasiado restrictivas para el uso práctico.

Para superar las deficiencias observadas de TB, es necesario referirse a una descripción matemática diferente de las realizaciones de procesos aleatorios de PMR, que se basan en la Regla de la Esperanza Matemática Condicional (REMC) (ver, por ejemplo, [4]). Con ayuda del método REMC, se determinan los procedimientos de recuperación óptimos de las realizaciones y los errores de reconstrucción mínimos para un número y localización de las muestras arbitrarios. En este caso, la función de recuperación es la función de esperanza condicional para un número fijo de muestras, y la función de

error cuadrático medio de la recuperación se caracteriza por la función de la varianza condicional. La aplicación del método REMC a la descripción del PMR de varios procesos y campos aleatorios se describen, por ejemplo, [5]-[7]. Cabe mencionar, que en la literatura no existe descripción del PMR de suma de dos procesos gaussianos. El presente trabajo aborda dicho problema.

Consideremos la suma de otros dos procesos gaussianos:

$$\zeta(t) = \xi(t) + \eta(t) \quad (1)$$

El estudio de este tema es de interés por al menos dos razones: 1) los sumadores para señales y ruido son elementos estándar en sistemas de doble canal para varios propósitos; 2) al modelar procesos aleatorios con funciones espectrales complejas, es conveniente formarlos agregando procesos cuyos espectros se describen mediante funciones bastante simples. (ver, por ejemplo, [8]). Cuando se suman dos procesos, aparecen dos opciones: 1) procesos son independientes, entonces es suficiente conocer las funciones de covarianza o los espectros correspondientes; 2) cuando los procesos tienen relaciones estadísticas, las características mencionadas, no son suficientes. Además de estos, uno debe conocer las funciones de covarianza mutua o las densidades espectrales correspondientes. Por lo general, los modelos gaussianos se forman mediante el uso de filtros lineales sometidos al ruido blanco. Entonces, los procesos de salida se determinan fácilmente por las características de los filtros. La función de covarianza y las características espectrales de tales procesos se pueden encontrar en muchos artículos. La situación con funciones de covarianza mutua es la siguiente: en la mayoría de los casos, es necesario calcularlas (ver más abajo).

En relación con lo anterior, el propósito del trabajo propuesto es el siguiente: describir el PMR de la suma de dos procesos gaussianos y determinar la influencia de todos los parámetros estadísticos de los procesos en las características fundamentales del PMR.

## 2. Regla de la Esperanza Matemática Condicional para Procesos Aleatorios

Consideremos un proceso aleatorio  $\xi(t)$  caracterizado por su fdp multidimensional

$w_\xi(x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_m(t_m))$ . Elegimos una realización  $x(t)$  del proceso  $\xi(t)$  y fijamos un conjunto de muestras  $X, T$  incluida  $N$ , es decir,  $X, T = \{x_1(T_1), x_2(T_2), \dots, x_N(T_N)\}$ . El número de muestreo  $N$  y los instantes de muestreo  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_N\}$  son arbitrarios y conocidos. Por tanto, de la información conocida  $w_\xi(x_1(t_1), x_2(t_2), \dots, x_m(t_m))$  y  $X, T$  es necesario la reconstrucción de una realización, bajo el criterio del error cuadrático medio como criterio de estimación [7]. Sin embargo, la esperanza matemática condicional asegura dicho criterio automáticamente. La aplicación de esta regla nos da la posibilidad de determinar las dos características principales de cada descripción del PMR de realizaciones de proceso aleatorios: 1) la función de reconstrucción o función de la esperanza matemática condicional:

$$\langle \tilde{\xi}(t) \rangle = \langle \xi(t) | X, T \rangle = \tilde{m}(t) \quad (2)$$

2) la función de error de reconstrucción o función de la varianza condicional

$$\langle [\tilde{\xi}(t) - \tilde{m}(t)]^2 \rangle = \langle [\xi(t) - m(t)]^2 | X, T \rangle = \tilde{\sigma}^2(t) \quad (3)$$

donde  $\langle \bullet \rangle$  es el operador del promedio estadístico.

Las fórmulas generales del REMC nos permiten estudiar el PMR de procesos no estacionarios. Sin embargo, a continuación, nos limitaremos a la opción de procesos estacionarios. En base a (2) y (3), escribimos las fórmulas deseadas para un proceso aleatorio gaussiano de tipo estacionario, con las siguientes características:  $m(t) = m = 0, \sigma^2(t) = 1, K(t_i - t_j) = R(t_i - t_j)$ , donde  $R(t_i - t_j)$  es la función de covarianza normalizada. Por tanto obtenemos (4)-(6) [9]:

$$\tilde{m}(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R(t - T_i) a_{ij} x_j(T_j) \quad (4)$$

$$\tilde{\sigma}^2(t) = 1 - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R(t - T_i) a_{ij} R(T_j - t) \quad (5)$$

$$\|a_{ij}\| = \|R(T_i - T_j)\|^{-1} \quad (6)$$

Aquí los valores  $a_{ij}$  son elementos de matriz inversa de función de covarianza, determinada para los instantes de la locación de muestras. Abajo centramos nuestra atención en el estudio de una característica más importante de PMR, es  $\tilde{\sigma}^2(t)$ .

### 3. Descripción General de Suma de Procesos Aleatorios

Examinemos  $\zeta(t)$  que representa la suma de dos procesos aleatorios  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$  en (1).

Para el estudio del PMR la suma de procesos aleatorios es necesario conocer su función de covarianza  $R_\zeta(\tau)$ . Para ello, es indispensable conocer una característica que describa la relación entre los procesos  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$ , que a continuación se define.

#### A. Función de Covarianza Mutua

Para caracterizar la relación de dos procesos aleatorios  $\xi(t)$  y  $\eta(t')$ , se usa la función de covarianza mutua  $R_{\xi\eta}(\tau)$  y  $R_{\eta\xi}(\tau)$  normalizada, las cuales determinan el momento de covarianza correspondientes a los valores elegidos en la base de tiempo  $t' = t + \tau$ . Formalmente las funciones de covarianza mutua se definen [10]:

$$R_{\xi\eta}(\tau) = \frac{1}{\sigma_\xi \sigma_\eta} \times \quad (7)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(u) h_2(v) R_\gamma(u - v + \tau) dudv$$

$$R_{\eta\xi}(\tau) = \frac{1}{\sigma_\xi \sigma_\eta} \times \quad (8)$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_1(u) h_2(v) R_\gamma(v - u + \tau) dudv$$

donde  $\sigma_\xi, \sigma_\eta$  es la desviación estándar de los procesos  $\xi(t), \eta(t)$ , respectivamente,  $h_1(t), h_2(t)$  son las funciones de respuesta al impulso de diferentes filtros.

Las expresiones (7) y (8) deben ser usadas cuando función de covarianza mutua es impar.

#### B. Descripción de la Suma de Procesos Aleatorios

Para describir estadísticamente el PMR del proceso  $\zeta(t)$  es necesario calcular la función de covarianza  $R_\zeta(\tau)$ , mediante (9):

$$R_\zeta(\tau) = \frac{R_\xi(\tau) + R_\eta(\tau) + R_{\eta\xi}(\tau) + R_{\xi\eta}(\tau)}{R_\xi(0) + R_\eta(0) + R_{\eta\xi}(0) + R_{\xi\eta}(0)} \quad (9)$$

En el caso particular, cuando los procesos  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$  son independientes, la expresión (9) se simplifica, porque  $R_{\xi\eta}(\tau) = R_{\eta\xi}(\tau) = 0$ :

$$R_\zeta(\tau) = \frac{1}{2}(R_\xi(\tau) + R_\eta(\tau)) \quad (10)$$

#### 4. Regla de la Esperanza Matemática Condicional para Procesos Aleatorios

El PMR definido en (4)-(6) se implementará en la reconstrucción de los procesos  $\zeta_1(t)$ ,  $\zeta_2(t)$  y  $\zeta_3(t)$ , que son procesos de la salida de un sistema de suma.

El proceso  $\zeta_1(t)$  formado por la suma de procesos markovianos  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$ , que son procesos de la salida de dos filtros RC diferentes.  $\zeta_2(t)$  es la suma de dos procesos  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$  no markovianos, en la salida de filtros RC de dos etapas diferentes. El proceso  $\zeta_3(t)$  es la suma de un proceso no markoviano  $\xi(t)$  y de un proceso markoviano. Los procesos  $\eta(t)$ ,  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$  son procesos de la salida de un filtro RC de dos etapas y una etapa, respectivamente. En todos los casos, los filtros tienen a la entrada ruido blanco de tipo gaussiano.

Para calcular la función de covarianza  $R_{\zeta_1}(\tau)$  en los filtros RC de primera etapa, tal que sus funciones de respuesta al impulso son:

$$h_1(t) = \alpha \exp(-\alpha t); t \geq 0 \quad (11)$$

$$h_2(t) = \beta \exp(-\beta t); t \geq 0 \quad (12)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros de cada filtro RC de una etapa pasa-baja, que describen su ancho de banda. Se conocen

las funciones de covarianza  $R_\xi(\tau)$  y  $R_\eta(\tau)$  en (13) y (14), correspondientemente.

$$R_\xi(\tau) = \exp(-\alpha|\tau|) \quad (13)$$

$$R_\eta(\tau) = \exp(-\beta|\tau|) \quad (14)$$

Se sustituye en (7) y (8) las fórmulas (11) y (12), para obtener las funciones de covarianza mutua (15) y (16):

$$R_{\xi\eta}(\tau) = \frac{2\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha + \beta} \begin{cases} e^{-\beta\tau}, & \tau \geq 0 \\ e^{\alpha\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$R_{\eta\xi}(\tau) = \frac{2\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha + \beta} \begin{cases} e^{-\alpha\tau}, & \tau \geq 0 \\ e^{\beta\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Por tanto, usando (9) obtenemos la función de covarianza del proceso  $\zeta_1(t)$ , en el caso general:

$$R_{\zeta_1}(\tau) = \frac{\alpha + \beta}{2(\alpha + \beta) + 4\sqrt{\alpha\beta}} \times \left[ \left( 1 + \frac{2\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha + \beta} \right) \exp(-\alpha|\tau|) + \left( 1 + \frac{2\sqrt{\alpha\beta}}{\alpha + \beta} \right) \exp(-\beta|\tau|) \right] \quad (17)$$

Para el caso independiente, la función de covarianza es (18)

$$R_{\zeta_1}(\tau) = \frac{1}{2} \left( \exp^{-\alpha|\tau|} + \exp^{-\beta|\tau|} \right) \quad (18)$$

Para conocer la influencia de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  en la función de covarianza de la suma de procesos, se muestra la familia de curvas en Fig. 1. Las curvas continuas corresponden al caso que considera la función de covarianza mutua; mientras la curva con líneas discontinuas corresponden al caso independiente.

En el caso independiente, al aumentar los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ , la función de covarianza  $R_{\zeta_1}(\tau)$  tiende rápido a cero.

Esto es provocado porque la función de covarianza  $R_{\zeta_1}(\tau)$  tiene el mismo comportamiento que las funciones de covarianza (13) y (14), que al aumentar cualquier valor de  $\alpha$  o  $\beta$  disminuye la dependencia estadística, porque aumenta el ancho de banda de cada filtro.

Mientras el caso dependiente, las funciones de covarianza mutua dependen del traslape del espectro de potencia entre los

procesos. Cuando se mantiene  $\beta$  constante y se aumenta  $\alpha$ , se reduce el traslape de los espectros de potencia. Esto explica el cambio de forma de la función de covarianza de la suma de procesos aleatorios cuando  $\alpha = 5; 10$ , en Fig. 1.

Para el cálculo de la función de covarianza  $R_{\zeta_2}(\tau)$ , se conocen las funciones de respuesta al impulso de dos filtros RC de dos etapas, diferentes:

$$h_1(t) = \alpha(1 + \alpha t) \exp(-\alpha t); t \geq 0 \quad (19)$$

$$h_2(t) = \beta(1 + \beta t) \exp(-\beta t); t \geq 0 \quad (20)$$

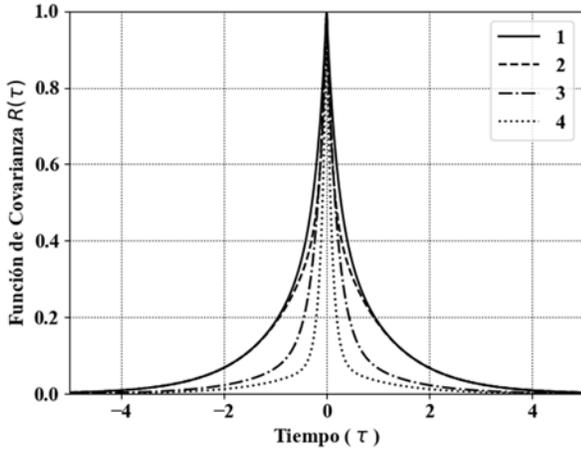


Fig. 1. Familia de curvas de  $R_{\zeta_1}(\tau)$ : a) caso dependiente: curva 1  $\alpha = 5; \beta = 1$ , curva 2  $\alpha = 10; \beta = 1$ ; b) caso independiente: curva 3  $\alpha = 5; \beta = 1$ , curva 4  $\alpha = 10; \beta = 1$ .

Mientras las funciones de covarianza de los procesos en la salida de cada filtro:

$$R_{\xi}(\tau) = (1 + \alpha|\tau|) \exp(-\alpha|\tau|) \quad (21)$$

$$R_{\eta}(\tau) = (1 + \beta|\tau|) \exp(-\beta|\tau|) \quad (22)$$

Las funciones de covarianza mutua se definen, sustituyendo en (7) y (8), las formulas (19) y (20):

$$R_{\xi\eta}(\tau) = \frac{4\alpha\beta\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^3} \begin{cases} [2 + (\alpha + \beta)\tau] e^{-\beta\tau}, & \tau \geq 0 \\ [2 - (\alpha + \beta)\tau] e^{\alpha\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$R_{\eta\xi}(\tau) = \frac{4\alpha\beta\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^3} \begin{cases} [2 + (\alpha + \beta)\tau] e^{-\alpha\tau}, & \tau \geq 0 \\ [2 - (\alpha + \beta)\tau] e^{\beta\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (24)$$

Por tanto, la función de covarianza de la suma de procesos no markovianos, se expresa como (9):

$$R_{\zeta_2}(\tau) = \frac{(\alpha + \beta)^3}{2(\alpha + \beta)^3 + 8\sqrt{\alpha\beta}} \times \left[ \left[ (1 + \alpha|\tau|) + \frac{(\alpha + \beta)}{2(\alpha + \beta) + 4\sqrt{\alpha\beta}} [2 + (\alpha + \beta)|\tau|] \right] e^{-\beta|\tau|} + \left[ (1 + \beta|\tau|) + \frac{(\alpha + \beta)}{2(\alpha + \beta) + 4\sqrt{\alpha\beta}} [2 + (\alpha + \beta)|\tau|] \right] e^{-\alpha|\tau|} \right] \quad (25)$$

Para el caso independiente, la función de covarianza  $R_{\zeta_2}(\tau)$ , se define como:

$$R_{\zeta_2}(\tau) = (1 + \alpha|\tau|) \exp(-\alpha|\tau|) + (1 + \beta|\tau|) \exp(-\beta|\tau|) \quad (26)$$

Consideremos la suma de un proceso con características no markovianas  $\xi(t)$  y un proceso markoviano  $\eta(t)$ . Para calcular su función de covarianza  $R_{\zeta_3}(\tau)$ , se utilizan las formulas (20) y (13) para calcular las funciones de covarianza mutua:

$$R_{\xi\eta}(\tau) = \frac{2\beta\sqrt{2\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^2} \begin{cases} [1 + (\alpha + \beta)\tau] e^{-\beta\tau}, & \tau \geq 0 \\ e^{\alpha\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (27)$$

$$R_{\eta\xi}(\tau) = \frac{2\alpha\sqrt{2\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^2} \begin{cases} e^{-\beta\tau}, & \tau \geq 0 \\ [1 - (\alpha + \beta)\tau] e^{\alpha\tau}, & \tau < 0 \end{cases} \quad (28)$$

Para calcular la función de covarianza  $R_{\zeta_3}(\tau)$ , utilizamos (22) y (13) en (9):

$$R_{\zeta_3}(\tau) = \left( \frac{2\alpha\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^2} + 1 \right) e^{-\alpha|\tau|} + \left[ \frac{2\beta\sqrt{\alpha\beta}}{(\alpha + \beta)^2} (1 + (\alpha + \beta)|\tau|) + (1 + \beta)|\tau| \right] e^{-\beta|\tau|} \quad (29)$$

En Fig. 2 se muestra la familia de curvas de  $R_{\zeta_3}(\tau)$ , cuando el parámetro  $\alpha$  es constante y  $\beta$  es variable. Se observa que el caso independiente, las funciones de son pares, dado que siguen el mismo comportamiento que las funciones de covarianza  $R_{\xi}(\tau)$  y  $R_{\eta}(\tau)$ . Mientras el caso dependiente, la función de covarianza  $R_{\zeta_3}(\tau)$  es asimétrica, porque las funciones de covarianza mutuas consideradas son asimétricas. En ambos casos al aumentar  $\alpha$  o  $\beta$ , disminuye el ancho de banda del espectro de potencia de cada proceso aleatorio, esto significa que la función de covarianza de la suma de procesos aleatorios tiende a cero cada vez más rápido.

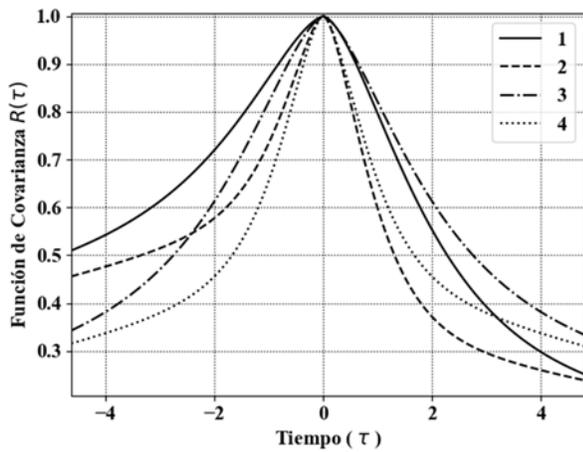


Fig. 2. Familia de curvas de la función de covarianza  $R_{\xi}(\tau)$ : a) caso dependiente: la curva 1  $\alpha=5; \beta=1$ , curva 2  $\alpha=10; \beta=1$ ; b) caso independiente: la curva 3  $\alpha=5; \beta=1$ , curva 4  $\alpha=10; \beta=1$ .

## 5. Calculo de las Funciones de Error de Reconstrucción

### A. PMR de la suma de procesos markovianos

Consideremos las siguientes condiciones  $N=2; \Delta T=0.4; \alpha=5; \beta=1$ , función de error de reconstrucción del caso dependiente presenta mejor reconstrucción que el caso independiente. Esta diferencia es provocada por la consideración de las funciones de covarianza mutuas. Ver Fig. 3. En la mitad del intervalo de muestreo existe un error máximo 0.5, 0.68 aproximadamente, para el caso dependiente e independiente respectivamente, Esto es provocado por los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ .

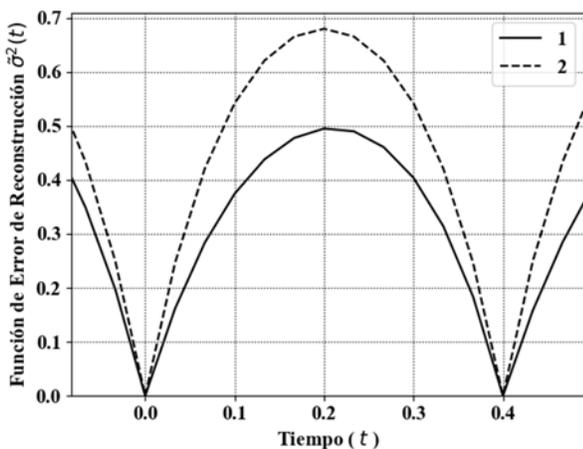


Fig. 3. Función de error de Reconstrucción caso markoviano: curva 1 caso dependiente; curva 2 caso independiente.

### B. PMR de la suma de procesos no markovianos

Bajo las siguientes condiciones:  $N=5; \Delta T=0.4; \alpha=5; \beta=1$ , para ilustrar la influencia de las funciones de covarianza del caso dependiente e independiente en el PMR.

En Fig. 4 se observa que la reconstrucción del proceso aleatorio de la función de covarianza con dependencia, entre los procesos  $\xi(t)$  y  $\eta(t)$ , es mejor que el caso independiente. También se observa que las muestras centrales tienen un menor error de reconstrucción respecto a la primera y última muestra, porque existe una dependencia estadística entre todas las muestras.

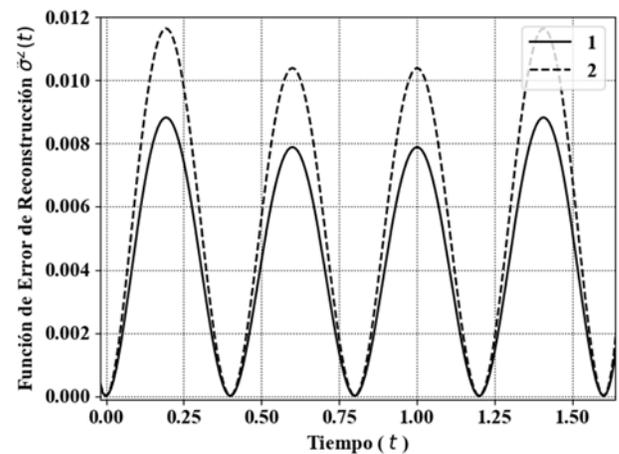


Fig. 4. Función de error de Reconstrucción caso no markoviano: curva 1 caso dependiente; curva 2 caso independiente.

### C. PMR de la suma de un proceso no markoviano con un proceso markoviano

Consideremos  $N=5; \Delta T=0.4; \alpha=5; \beta=1$ . Se observa que en Fig. 5, que la función de error de reconstrucción de la función de covarianza del caso dependiente presenta una inclinación hacia la izquierda, respecto a la función de covarianza del caso independiente. Dicha inclinación es provocada por la función de covarianza mutua.

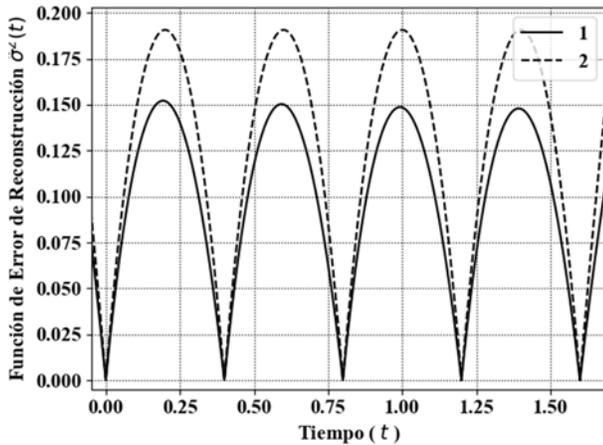


Fig. 5. Función de Error de Reconstrucción de la suma de un proceso no markoviano con un proceso markoviano: curva 1 caso dependiente; curva 2 caso independiente.

### 3. Conclusiones

Como conclusión general, el uso de la regla de la esperanza matemática condicional como método para la reconstrucción de realizaciones de procesos aleatorios, este método nos permite reconstruir con un número de muestras finitas y su locación de arbitraria. Además, podemos conocer el error de reconstrucción para cada caso. La consideración de las funciones de covarianza mutua en la suma de procesos aleatorios incrementa la calidad de la reconstrucción, como se muestra en la sección 5.

De manera particular, cuando ambos procesos son markovianos, entonces su error de reconstrucción depende exclusivamente de dos muestras vecinas. Gracias a que los procesos markovianos son caóticos error de reconstrucción es mayor que en las otras variantes. La calidad del PMR de la suma de procesos markovianos y no markovianos presenta una influencia en la reconstrucción entre todas sus muestras. El caso de la suma de procesos no markovianos es más evidente, esta influencia que el caso markoviano, como se muestra en Fig. 3 y Fig. 5.

Otra conclusión particular, es la calidad de reconstrucción de la suma de un proceso markoviano y con un proceso no markoviano es mejor, que la reconstrucción de dos procesos markovianos, esto se explica por la propiedad de diferenciación de procesos  $\zeta_3(t)$  y carente en  $\zeta_1(t)$ .

### 4. Referencias

- [1] A.V. Blakrishnan. "A Note on the Sampling Principle for Continuous signals". IRE Trans. On Inf. Theory. Vol. IT-3, pp. 143-146, 1957.
- [2] A. Malakhov, "Cumulant analysis Non-Gaussian Process and Their Transformation", Sovetskoe Radio, Soviet Union, 1976.
- [3] C. L. Nikias, A. P. Petropulu, "Higher-Order Spectra Analysis", Edit. Prentice Hall Signal Processing Series, Estados Unidos, 1993.

- [4] P. E. Pfeiffer, "Probability for Applications", Edit. Springer-Verlag New York, Estados Unidos, 1990
- [5] Y. S. Shmaliy. "Probability Interpretation, Theory and Applications", Nova Science Publishers, Inc. Chapter 9 and Chapter 10, New York, EUA. 2012.
- [6] D. Rodríguez, V. Kazakov, "Procesamiento de Muestreo y Reconstrucción", Edit. Acadmica Española, Saarbrücken, 2012.
- [7] V. A. Kazakov, Y. A. Goritskiy. "Muestreo-Reconstrucción de Realizaciones de Procesos y Campos Markovianos Aleatorios" Edit. IPN, Mexico, 2017.
- [8] V. I. Tikhonov, B. I. Sakhtarin, V. V. Sizykh. Procesos aleatorios. Vol. 1, Moscow, "Radio i Sviaz", 2003. (En Ruso.)
- [9] R. L. Stratonovich, "Topics in the Theory of Random Noise". Vol. 1, Edit. Gordon and Breach, 1967.
- [10] B. R. Levin, "Fundamentos de Radio-Técnica Estadística", Edit. Marcombo, España, 1984-

### 5. Biografías

**Vladimir Kazakov** nació en Rusia en 1941. Recibió el grado de Doctor en Telecomunicaciones en el Instituto Energético de Moscú en 1967. Defendió su Full-Doctor en Ciencias en el Instituto Energético de Moscú en 1990.

Trabajo como docente, profesor y jefe de departamentos en la Universidad Estatal de Radio-Ingeniería en Ryazan de 1966 a 1996, y desde 1996 hasta el presente ha trabajado en el Instituto Politécnico Nacional.

**Yuri Goritskiy** nació en Rusia en 1940, recibió el grado de doctor en Telecomunicaciones en 1971 en el Instituto Energético de Moscú. Defendió su Full-Doctor en Ciencias en el Instituto Energético de Moscú en 2002.

Trabajo como docente en el Instituto Energético de Moscú y en el Instituto de Volcanología en Petropavlov Kamchatka entre 1963 hasta 1990. Actualmente labora como profesor en el Instituto Energético de Moscú.

**Francisco Mendoza** nació en Oaxaca en 1993, en 2018 obtuvo el grado de M. en C. de la Ingeniería en Telecomunicaciones en el Instituto Politécnico Nacional, y actualmente está estudiando el doctorado en la misma institución.

# Implementación de una LPS a partir de una AOPLA para la sistematización de la producción en empresas manufactureras textiles

L.I. Arcos<sup>1,a</sup>, E. Vazquez<sup>b</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Academia Ingeniería Informática

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, Academia Ingeniería Informática

<sup>a</sup> [lilianavette.arcos@live.itsteziutlan.edu.mx](mailto:lilianavette.arcos@live.itsteziutlan.edu.mx), <sup>b</sup> [emmanuel.vazquez@live.itsteziutlan.edu.mx](mailto:emmanuel.vazquez@live.itsteziutlan.edu.mx)

## Resumen.

Las industrias textiles actualmente enfrentan el reto de administrar la información de manera integral en todos los departamentos que la conforman, deben actualizarse en la forma de administrar y coordinar la información, además de incluir el uso de tecnologías que permitan su productividad facilitando sus procesos tanto operativos como administrativos. En el ámbito industrial, las herramientas tecnológicas aplicadas al servicio tienen como propósito ser más eficientes en sus labores cotidianas ya que los registros manuales toman mucho tiempo y deben ser actualizados con métodos obsoletos corriendo el riesgo de errores o pérdida de datos. Una sistematización mediante software en la industria textil permite que las actividades de distintas áreas agreguen valor al negocio.

El presente artículo, muestra la investigación sobre la sistematización en la industria textil, orientada a contribuir tecnológicamente con enfoque administrativo en el ámbito manufacturero textil. Donde, primeramente, se estableció la hipótesis, llegando a una determinación de la investigación experimental, eligiendo al grupo de trabajo que sería eficaz para demostrar la optimización de tiempo primordialmente en el área de recursos humanos, producción, preproducción y gerencia, agilizando procesos en la obtención de información, control de horarios, productividad, así como de las horas laborales y extras de los empleados en la Comercializadora Keter S.A. de C.V. de Teziutlán, Puebla.

El análisis de la investigación está basado en las metodologías experimental y cualitativa, para la especificación de los requerimientos se utilizó el formato del estándar IEEE 830 (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos en, E.U.A.); permitiendo realizar experimentos y generar resultados, con formatos elaborados por el comité de estándares de ingeniería de software, validando y probando el software.

Se presentan resultados demostrativos del análisis donde arroja el comparativo de la optimización de tiempos y mejora en la gestión de procesos.

*Palabras clave.* LPS, AOPL, sistematización, producción, industria textil.

## 1. Introducción

Diversos estudios han plasmado la problemática que enfrenta la industria textil en México (ITAM, 2010) en el cual señala que desde el año 2000, la industria textil desafía la competencia de países como China; desavinando una crisis que se traduce en baja de producción, ventas, y una continua pérdida de competitividad.

Hoy en día, las pequeñas y grandes empresas (PYMES) están al tanto de las innovaciones que pueden representar la incursión de aplicaciones web para el control o monitorización de los procesos que se llevan a cabo para la producción de su producto o servicio. El implementar una LPS (Línea de Productos de Software) basado en una arquitectura de software orientada a aspectos, que permita gestionar sus recursos, la producción, manejo de tiempos y reportes, entre otras sistematizaciones que

se realizan concretamente en una empresa de la industria textil conlleva a tener económicamente beneficios, automatizando y estandarizando la gestión de todos los procesos, bienes materiales o inmateriales, recurso humano y clientes; apoyando la toma de decisiones con datos e información siempre disponible, veraz, oportuna y planificada, desencadenando buenas prácticas dentro de la industria textil.

Como lo definen Svahnberg & Bosch, una arquitectura de línea de productos orientada a aspectos (AOPLA) por sus acrónimos en inglés (Aspect Oriented Product Line Architecture), son servicios de software que cumplen con un modelo de calidad específico para líneas de un producto, además de un enfoque orientado a intereses que permite la identificación y manejo de los mismos, así como el soporte de variabilidad, satisfaciendo necesidades que se involucran en diferentes áreas, gestionando a la Industria con el uso de la tecnología.

Específicamente, el desarrollo e implementación de una LPS (Línea de Productos de Software) en una Empresa Manufacturera Textil, utilizando la técnica de resolución de variabilidad a nivel de componente (Svahnberg & Bosch, 2000) a partir de una AOPLA (Arquitectura de Línea de Productos Orientada a Aspectos) ha sido el método de construcción de software, basado en el diseño de una sistematización para industrias manufactureras de la región, siendo este giro el más importante por ser pilar del desarrollo regional en la industria textil con mayor presencia en el Estado de México, Puebla, Hidalgo, Cd. de México, Guanajuato y fundamentado en estadísticas del INEGI, específicamente del municipio de Teziutlán (INEGI).

El proceso de producción textil varía entre empresas, sin embargo; se determina que, el proceso de producción da inicio con una orden de producción, en la que se especifica las prendas a producir, como son tallas, colores, estilos, operaciones, corte de tela, ensamble y revisado. La productividad de un operador se mide por el número de operaciones que realiza al día, esto se plasma en un formato llamado bihorario u horario dependiendo del número de veces que registre la información, este proceso implica un esfuerzo significativo en horas hombre, para el cálculo de la

productividad y el seguimiento del avance de la orden de producción.

El desarrollo de software a partir de una AOPLA para empresas manufactureras textiles, impacta positivamente con el desarrollo económico de la región, logrando reutilizar y evolucionar mediante software las órdenes de producción en dichas industrias, consistiendo en un conjunto de vistas de alto nivel a partir de la cual se obtienen los productos específicos de la línea, sustentados en componentes como marco referencial, asentado en el modelo propuesto por John Cheesman y John Daniels para la especificación de software basado en componente, como resultado se obtiene una arquitectura de software detallada (Cheesman & Daniels, 2000).

Sosteniéndose, con la ingeniería de línea de productos de software (ILPS) como paradigma para realizar aplicaciones de software y haciendo uso de plataformas y personalización masiva (Klaus, Bockle, & Van del Linder, Software Product Line Engineering. Foundation, Principles, and Techniques, 2005) y contemplando las dos etapas principales para la realización de una LPS como son: la ingeniería de dominios y la ingeniería de aplicaciones (Clements & Northrop, 2001) logrando enmarcar efectivamente la productividad y competitividad ante los cambios que demanda la industria textil en el mercado.

La programación orientada a aspectos POA es una extensión o complemento de la programación orientada a objetos, que busca resolver problemas de reutilización de código en donde la herencia o delegación pueda ser utilizada de manera satisfactoria (Kiczales, et al. 1997). La POA permite capturar los intereses que se presentan en distintas partes de un sistema en entidades bien definidas llamadas aspectos (Aspect), cuya funcionalidad transversal (cross-cutting) se implementa de forma modular y separada del resto del sistema y puede afectar a varias de sus partes. Éste tipo de programación se relaciona con los requisitos no funcionales del sistema tales como seguridad, rendimiento, disponibilidad, estabilidad, portabilidad, etc.

En AOPLA la arquitectura definida tiene un nivel de abstracción alto, por lo que la modificación del método se centra en la etapa del modelado de la arquitectura y se generan nuevos artefactos:

- Modelo de conceptos de negocio
- Modelo de tipos de negocio
- Diagrama de especificación de interfaces
- Diagrama de especificación de componentes
- Diagramas de secuencia por componente

## **2. Parte técnica del artículo**

Actualmente en el mercado existen opciones de administración para la industria textil, funcionando dichas versiones como un ERP (Sistema de Planificación de Recursos Empresariales), en el cual integran las áreas de una maquiladora de forma general, pero ninguna realiza a detalle la administración mediante un sistema que trabaje de manera conjunta con todos los departamentos existentes en la empresa.

Considerando la importancia que actualmente presenta la innovación en la gestión informática, los servicios de internet y el desarrollo de software incursionando con aplicaciones web para el control o monitorización de los procesos que se llevan a cabo para la producción de su producto o servicio, se implementan sistemas que administren órdenes de producción y bonificaciones de productividad, donde se utilizan bihorarios, que permiten visualizar los avances de dichas órdenes y la productividad por cada trabajador, mediante una aplicación móvil se da seguimiento a estas órdenes, impactando directa e indirectamente a distintas áreas de una industria textil. Para ello, se ha planteado el análisis del impacto que genera la implementación de los sistemas; teniendo, como objetivo demostrar la reducción eficaz de los tiempos de gestión en los procesos ante las necesidades que demandan las industrias manufactureras textiles.

La hipótesis planteada demuestra; si la implementación de una línea de productos a partir de una arquitectura de software orientada a aspectos, para la gestión de la información de producción en empresas manufactureras textiles, aumenta la productividad; reduciendo los tiempos en la administración de la información en el ámbito textil, en comparación con los métodos tradicionales, arrojando como variable dependiente; si optimiza los tiempos en la gestión de información (efecto-resultado) y variable independiente; la implementación de una sistematización (causa) y la pregunta de investigación ¿la implementación de una LPS a partir de una AOPLA para sistematización de la producción es útil en la optimización de tiempos en los procesos en una empresa manufacturera textil?

El objetivo ha sido medir la productividad con los métodos de gestión tradicionales a diferencia de una implementación de una LPS, para la gestión de procesos en empresas manufactureras textiles de la región nororiental del Estado de Puebla, a partir de una AOPLA; se determinan los aspectos considerados de impacto en la producción.

El proceso de producción varía de una empresa textil a otra; sin embargo, en el año 2017 se implementó un software para la administración del proceso de producción en la empresa, "Confecciones de la Rosa S.A. de C.V." obteniendo beneficios y resultados eficientes por su ejecución, en 2018 se analizaron procesos en empresa manufacturera textil "Comercializadora KETER S.A. de C.V." y se determinó la similitud de áreas pero

con diferencia entre algunos procesos y estructuras, por lo que se llevó a cabo una especificación de requerimientos IEEE. 830 para el desarrollo e implementación del sistema integral.

La LPS impacta de manera positiva en la industria manufacturera textil; logrando contribuir con el medio ambiente en la reducción de costos de papelería, llevando un mayor control de la información, automatizando tareas y mejorando la comunicación entre los participantes, otorgando valor agregado al cliente.

De acuerdo a una investigación donde se implementó un software para administrar el proceso de producción, se pudo observar y demostrar que, en un solo proceso una persona gana aproximadamente \$55.55 por hora, en contraste al proceso de administración manual se requiere de 2 horas con 10 minutos y 35 segundos para administrar una orden de producción, pero mínimo al día se requieren administrar 4 órdenes por lo que se genera un sueldo diario de \$483.64, en cambio al utilizar el sistema solo necesita de 43 minutos y 33 segundos, lo cual arroja un sueldo diario de \$161.30, lo cual anualmente, la industria pagaría por los servicios de dicha persona la cantidad de \$116,074.07 con el método tradicional y solo \$38,711.11 utilizando el sistema, ahorrando \$77,362.96; los cual indica una mejora en costos de productividad de mínimo el 66%.

#### A. Metodología

Maldonado (2015), considera que la investigación experimental trata de una colección de diseños de investigación que utilizan la manipulación y las pruebas controladas para entender los procesos causales; el tipo de investigación cuasi-experimental, utilizada aplica una selección puntualmente de los participantes, y se evalúa un antes y después, misma que se adapta al tipo de investigación. Los diseños cuasi-experimentales son los principales instrumentos de trabajo dentro del ámbito aplicado, dado esto se consideran los cuasiexperimentos como una alternativa a los experimentos de asignación aleatoria (Cook & Campbell, 1986).

En la obtención y definición de requerimientos para generar una reingeniería de procesos y, por consiguiente, adaptar el sistema de información como una LPS cubriendo las necesidades de la empresa, se llevó a cabo actividades como: Identificar las variables de esta investigación, para después concentrar una serie de entrevistas con los individuos del grupo elegido. De igual manera, se aplicó protocolos estandarizados que permitieron realizar las observaciones pertinentes que aseguran un resultado más objetivo.

Se midió la equivalencia entre los sujetos estudiados previamente para poder realizar un comparativo de tiempos y eventos objetivo en las actividades de gestión tradicional y que desencadenan productividad en contraste a la sistematización con la implementación de LPS, para la gestión de procesos en empresas manufactureras textiles de la región nororiental del

Estado de Puebla, a partir de una AOPLA (Ver Tabla I.- Variables de investigación).

TABLA I. VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.

Variable dependiente	Variable independiente
Se optimizan los tiempos en la gestión de información (efecto-resultado)	Implementación de una LPS a partir de una AOPLA para sistematizar la producción (causa)
Pregunta de investigación:	
¿la implementación de una LPS a partir de una AOPLA para sistematización de la producción es útil en la optimización de tiempos en los procesos en una empresa manufacturera textil?	

En la opinión de Kirk, por razones prácticas es necesario utilizar grupos ya formados; específicamente, en esta investigación, por lo que se estudiaron los tiempos en los eventos de actividades tradicionales (Ver Tabla II.- Grupo de datos estudiados, con actividades tradicionales).

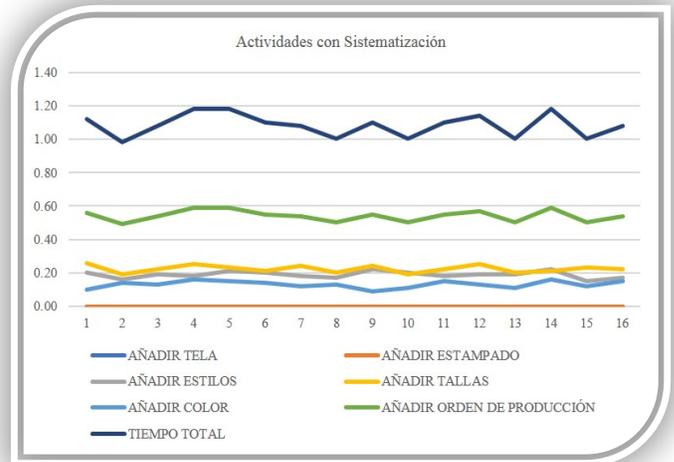
TABLA II. GRUPO DE DATOS ESTUDIADOS, CON ACTIVIDADES TRADICIONALES.

NO. ORDEN	AÑADIR TELA	MANUAL					AÑADIR ORDEN DE PRODUCCIÓN	TIEMPO TOTAL
		AÑADIR ESTAMPADO	AÑADIR ESTILOS	AÑADIR TALLAS	AÑADIR COLOR	AÑADIR ORDEN DE PRODUCCIÓN		
1	145	0.16	1.14	1.19	0.00	0.17	2.01	4.67
2	146	0.00	1.09	1.18	0.00	0.00	2.08	4.35
3	147	0.00	0.58	1.23	0.00	0.00	1.45	3.26
4	148	0.25	0.59	1.32	0.00	0.18	1.38	3.72
5	149	0.00	1.07	1.16	0.00	0.23	1.53	3.99
6	150	0.00	1.15	1.04	0.00	0.27	1.44	3.90
7	151	0.00	1.06	1.11	0.00	0.00	1.37	3.54
8	152	0.00	1.04	1.17	0.00	0.00	1.41	3.62
9	153	0.00	1.09	1.12	0.00	0.00	1.39	3.60
10	154	0.00	1.14	1.02	0.00	0.00	1.39	3.55
11	155	0.00	1.08	0.59	0.00	0.00	1.23	2.90
12	156	0.00	1.00	0.49	0.00	0.00	1.29	2.78
13	157	0.00	0.58	0.58	0.00	0.00	1.40	2.56
16	158	0.23	0.47	0.47	0.00	0.00	1.20	2.37
17	159	0.18	0.56	0.56	0.15	0.22	1.30	2.97
18	160	0.00	0.52	0.52	0.00	0.00	1.09	2.13
99	161	0.00	1.11	1.05	0.00	0.18	1.36	3.70
19	162	0.00	1.02	0.42	0.16	0.00	1.09	2.69
79	163	0.15	1.00	0.50	0.00	0.00	1.15	2.80
94	164	0.14	0.48	0.45	0.00	0.00	1.07	2.14
60	165	0.00	0.55	0.49	0.18	0.00	1.30	2.55

En comparación, se demostró que la implementación de una arquitectura orientada a aspectos de sistematización para producción en empresas manufactureras textiles arroja, que sí aumenta la productividad, reduciendo los tiempos en la administración de información en el ámbito textil (Ver Tabla III.- Grupo de datos estudiados, con actividades sistematizadas).

TABLA III. GRUPO DE DATOS ESTUDIADOS, CON ACTIVIDADES SISTEMATIZADAS.

NO. ORDEN	ACTIVIDADES CON SISTEMATIZACIÓN						TIEMPO TOTAL
	AÑADIR TELA	AÑADIR ESTAMPADO	AÑADIR ESTILOS	AÑADIR TALLAS	AÑADIR COLOR	AÑADIR ORDEN DE PRODUCCIÓN	
1	0.00	0.00	0.20	0.26	0.10	0.56	1.12
2	0.00	0.00	0.16	0.19	0.14	0.49	0.98
3	0.00	0.00	0.19	0.22	0.13	0.54	1.08
4	0.00	0.00	0.18	0.25	0.16	0.59	1.18
5	0.00	0.00	0.21	0.23	0.15	0.59	1.18
6	0.00	0.00	0.20	0.21	0.14	0.55	1.10
7	0.00	0.00	0.18	0.24	0.12	0.54	1.08
8	0.00	0.00	0.17	0.20	0.13	0.50	1.00
9	0.00	0.00	0.22	0.24	0.09	0.55	1.10
11	0.00	0.00	0.20	0.19	0.11	0.50	1.00
12	0.00	0.00	0.18	0.22	0.15	0.55	1.10
13	0.00	0.00	0.19	0.25	0.13	0.57	1.14
14	0.00	0.00	0.19	0.20	0.11	0.50	1.00
15	0.00	0.00	0.22	0.21	0.16	0.59	1.18
16	0.00	0.00	0.15	0.23	0.12	0.50	1.00
17	0.00	0.00	0.17	0.22	0.15	0.54	1.08



La interpretación del contexto; basado en un análisis de los resultados a través del experimento se observan en la Figura 1. (Ver Fig. 1 Contexto de Actividades Tradicionales).

Fig. 2 Contexto de Actividades Sistematizadas

Detectando que la herramienta tecnológica es eficaz y de utilidad, al tratarse de un software que trae consigo ventajas como la optimización del tiempo (Ver Fig. 3. Comparativo de resultados tradicionales VS sistematizados).



Fig. 1 Contexto de Actividades Tradicionales.

Como resultado de la investigación llevada a cabo, se deduce que la sistematización cubre la necesidad detectada en la administración del área de recursos humanos en la industria textil, con la disminución de tiempo en la captura de órdenes de producción, logrando la comprobación de la hipótesis planteada, donde se realizaron pruebas a partir de la implementación y donde los encargados generan una correcta administración. (Ver Fig. 2 Contexto de Actividades Sistematizadas).

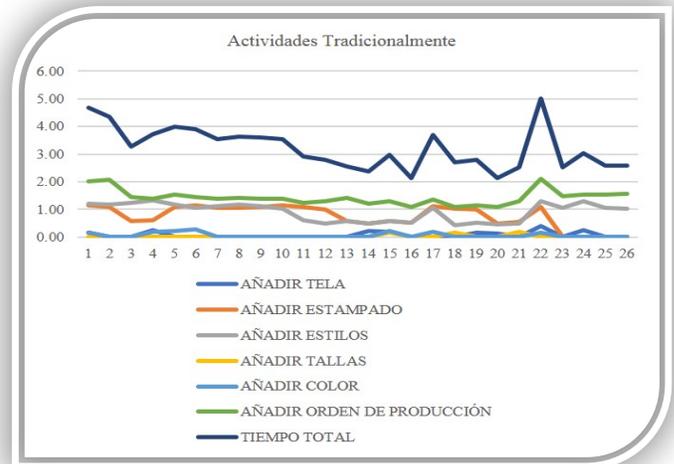


Fig. 3 Comparativo de resultados tradicionales VS sistematizados.

### 3. Conclusiones

La sistematización ha sido probada e implementada completa y aceptadamente; hoy en día se encuentra operando en las áreas de las industrias textiles como Confecciones de la Rosa S.A. y Comercializadora Keter S.A. de C.V. Diariamente es utilizado por los usuarios responsables del área de producción, desencadenando un beneficio a usuarios indirectos como sus directivos. En esta implementación de

sistematización mediante una LPS, la industria textil contribuye a la gestión de sus recursos, la producción, manejo de tiempos y reportes, entre otras operaciones que se realizan en una empresa con esta dinastía; conllevando a tener ciertos beneficios significativamente como el ahorro de dinero, gracias a la aplicación de administrar procesos, bienes materiales o inmateriales, toma de decisiones, recurso humano y clientes; debido a que la empresa tendrá los datos e información siempre disponible y una planificación definida correctamente, se estandarizo la empresa sobre sus procesos contribuyendo a la mejora y ayudando a definir las buenas prácticas que desencadenen una competitividad incorporando el uso de TIC's en las industrias manufactureras textiles.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye, que esta AOPLA puede ser adaptada para la implementación en las empresas con giro manufacturero textil, comenzando por las de la región y siguiendo con los alrededores de ésta, consiguiendo elevar el nivel de competencia en su producción.

#### **4. Referencias**

- [1] Kirk J, Miller ML. Reliability and validity in qualitative research. University Papers series. Qualitative research methods, Volumen 1. Thousand Oaks: Sage; 1986. p. 1-10.
- [2] Maldonado, T. (2010). Investigaciones experimentales. Calameo. Obtenido de <https://es.calameo.com/read/0048329503c16e02e67dd>
- [3] Méndez, G. (22 de octubre de 2008). Especificación de Requisitos según el estándar IEEE830. Obtenido de FDI: <http://www.fdi.ucm.es/profesor/gmendez/docs/is0809/ieee830.pdf>
- [4] ITAM, C. d. (2010). Instituto Tecnológico Autónomo de México (2010). La Industrial Textil en México; Diagnóstico Prospectiva y Estrategia. México D.F.: ITAM.
- [5] Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (1998). Software Architecture in Practice., New York, NY.: Addison-Wesley.
- [6] Bosch, J., Van Gurp, J., & Svahnberg, M. (n.d.). A Taxonomy of Variability Realization Techniques.
- [7] Cheesman, J., & Daniels, J. (2000). UML Components a simple process for specifying component-based software. Addison Wesley.
- [8] Clements, P., & Northrop, L. (2001). Software Product Lines: Practices and Patterns. Boston: Addison-Wesley.
- [9] Clements, P., Bachmann, F., & Bass, L. (2002). Documenting Software Architectures Views and Beyonds. Addison Wesley.
- [10] INEGI (2019) Censo económico 2019

#### **5. Biografías**

Arcos Perdomo Liliana Ivette, Lic. en Informática, Maestra en Sistemas Computacionales, Docente I.T.S.T.

Vázquez Benito Emmanuel, Lic. en Informática, Maestro en E-Learning, Docente I.T.S.T.

# Blockchain Distributed Ledgers and Their Impact on Medicine

Mauricio A. Saca  
Universidad Don Bosco, El Salvador  
saca.menendez@gmail.com

**Resumen**—Es un momento importante para todos los contextos políticos, deportivos, económicos, procedimentales, médicos, etc. Tanto de sectores públicos como privados. En donde la era digital nos está empujando a la cuarta revolución industrial, gracias a los avances tecnológicos en inteligencia artificial, estructuras de datos distribuidas, descentralización, herramientas de análisis basadas en datos que se han convertido en soluciones valiosas para diversas aplicaciones, y a través de un enfoque innovador, el tratamiento de los expedientes clínica de un paciente se puede llevar a un nivel digital y distribuido con el potencial de una de estas nuevas tecnologías como la Blockchain.

*Palabras clave.* Blockchain, Bloque, Estructura de datos distribuida, Tecnologías de la salud, Expediente clínico.

## I. INTRODUCCIÓN

**B**lockchain tiene el potencial de transformar el sector público y privado con un impacto significativo en la agilización, unificación e integración de procesos en el registro médico nacional, debido a que en la actualidad en El Salvador no se cuenta con ningún tipo de mecanismo (sistema informático) con la capacidad de registrar, consultar y compartir datos de expedientes clínicos de pacientes; por consiguiente, la interoperabilidad presentada puede ser abordada a través de la puesta en marcha de este tipo de tecnologías. Blockchain es un registro descentralizado que se mantiene permanente y a prueba de falsificaciones, acelera la verificación y confirmación. Además, debido a su tecnología de encriptación y la dispersión de la información es muy difícil de hackear y no es susceptible a un solo punto de falla técnica como también reduce en gran medida los costos de transacción mediante la eliminación de intermediarios innecesarios y la duplicación de documentos. En el presente documento, se discutirá la problemática y como el correcto uso de la Blockchain podría solventarlo.

## II. OBJETIVO

El objetivo principal es proveer una investigación que pueda ser base para la puesta en implementación de un sistema integrado de expedientes clínicos, que beneficie a la sociedad civil de El Salvador.

<sup>1</sup>Historia clínica se origina con el primer episodio de enfermedad o control de salud en el que se atiende al paciente, ya sea en el hospital o en el centro de atención primaria, o en un consultorio médico.

<sup>2</sup>Visión holística indica que para un correcto tratamiento terapéutico se debe tener en cuenta el entorno y los diferentes aspectos que componen a la persona.

## III. EL HISTORIAL CLINICO Y SU POCA EFICIENCIA ACTUAL

### A. Manejo de los expedientes clínicos

El manejo de la información de los expedientes clínicos por paciente considera el guardado, acceso controlado y el compartir de una manera segura la información, como aspectos importantes para una transparente gestión de los procesos para cada historia clínica<sup>1</sup>.

El adecuado uso y tratamiento, mejorara los resultados de la atención médica para cada ciudadano, al permitir tener una visión holística<sup>2</sup>, tratamientos personalizados y una comunicación efectiva.

Ahora bien, situándonos en un contexto real, no existe un manejo como tal actualmente, dando paso a dificultades, debido a que administrar datos de expedientes clínicos, es una tarea desafiante por su naturaleza sensible y los problemas de confianza subsiguientes, que es una de las razones principales por lo que los sistemas de expedientes clínicos están desconectados. Los resultados son evidentes al tener datos y servicios de forma dispersa en varias instituciones, y estas dificultades automáticamente pasan a perjudicar al profesional de la salud y el paciente:

#### 1. Profesional de salud

No tienen acceso a los expedientes completos de los pacientes, lo que dificulta el diagnóstico y tratamiento posteriores, sea en consultas rutinarios o emergencias de turno, así como también ralentizando las investigaciones científicas en salud.

#### 2. Paciente

Tiempos de consultas más largos, posibles pérdidas de expediente clínico por parte de la institución, mayor costo de la salud son las principales consecuencias.

## IV. BLOCKCHAIN Y UNA POSIBLE SOLUCIÓN

### A. ¿Qué es Blockchain?

Es una estructura de datos en la que la información contenida se agrupa en conjuntos (bloques) a los que se le añade metainformación relativas a otro bloque de la cadena anterior, es una línea temporal, de manera que, gracias a técnicas criptográficas, la información contenida en un bloque solo puede ser repudiada o editada modificando todos los bloques posteriores. Además, puede visualizarse como una base de datos distribuida que se puede aplicar a todo tipo de transacciones y seguimiento de bienes.

En donde un bien puede ser:

- Casa
- Carro
- Dinero
- Propiedad intelectual
- Información Personal

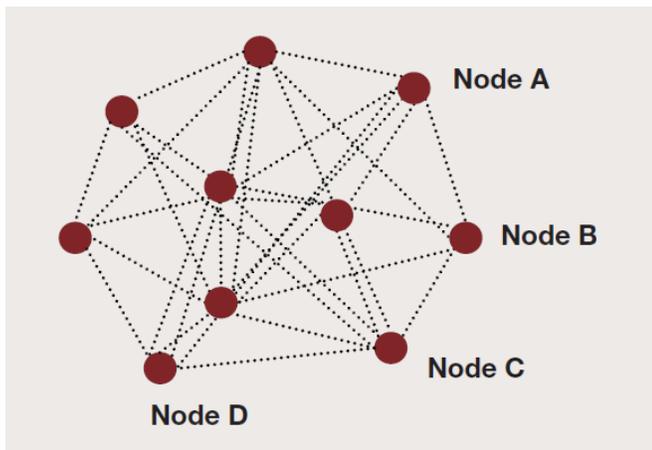


Fig I. Representación de la Blockchain como una red distribuida.

Cuando se habla de una red distribuida, básicamente quiere decir que cualquier información (bloque) que es añadido a la red, automáticamente es replicado a todos los nodos que la conforman, otorgando un nivel de transparencia y seguridad muy altos.

En contexto la blockchain están políticamente descentralizadas (nadie las controla) y arquitectónicamente descentralizadas (no hay un punto de fallo central infraestructural) pero están lógicamente centralizadas (hay un estado comúnmente acordado y el sistema se comporta como una sola computadora).

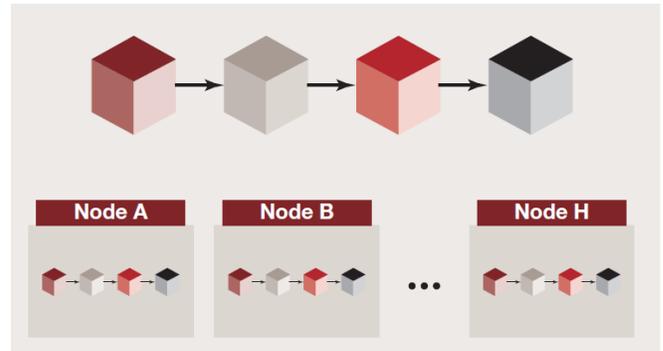


Fig II. Representación de la línea temporal de la Blockchain.

Cada uno de los bloques está conformado por 3 partes:

- El hash<sup>3</sup> del bloque anterior
- Un paquete formado por todas las transacciones (información que se desea enviar)
- El hash del bloque

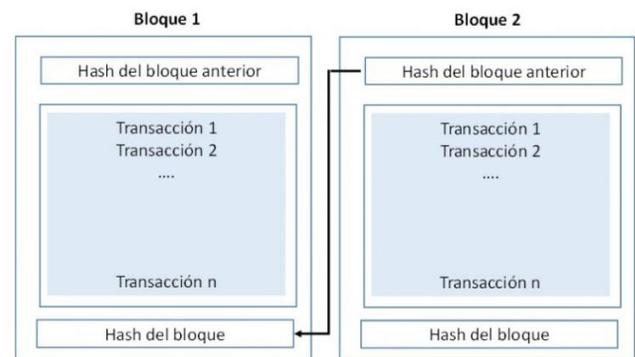


Fig III. Representación de un bloque de información.

### B. Tipos de Blockchain

Existen dos tipos de blockchain:

- Abiertas
  - Público sin permisos
  - Público con permisos
- Cerradas
  - Consorcio
  - Privadas y con permisos (“empresariales”)

<sup>3</sup>Hash es un algoritmo matemático que transforma cualquier bloque arbitrario de datos en una nueva serie de caracteres con una longitud fija. Independientemente de la longitud de los datos de entrada, el valor hash de salida tendrá siempre la misma longitud.

\* Requiere una inversión significativa en hardware de minería (modelo de prueba de trabajo) o en criptomoneda (modelo de prueba de estaca)

Tabla 1. Blockchain abiertas sin permisos

Acción	Descripción
Lectura	Abierta a todo público.
Escritura	Nadie.
Hacer	Nadie*.
Ejemplos	Bitcoin <sup>4</sup> .

Tabla 2. Blockchain abiertas con permisos

Acción	Descripción
Lectura	Abierta a todo público.
Escritura	Participantes autorizados.
Hacer	Todos o un subconjunto de participantes autorizados.
Ejemplos	Sovrin <sup>5</sup> .

Tabla 3. Blockchain cerradas, consorcio

Acción	Descripción
Lectura	Restringido a un conjunto de participantes.
Escritura	Participantes autorizados.
Hacer	Todos o un subconjunto de participantes autorizados.
Ejemplos	Múltiples bancos que operan un libro mayor compartido.

Tabla 4. Blockchain cerradas con permisos

Acción	Descripción
Lectura	Totalmente privado o restringido a un conjunto limitado de nodos autorizados.
Escritura	Operador de red únicamente.
Hacer	Operador de red únicamente.
Ejemplos	Contabilidad interna del banco compartida entre la matriz y las filiales.

<sup>4</sup>Bitcoin es un protocolo y red P2P que se utiliza como criptomoneda, sistema de pago y mercancía.

<sup>5</sup>Sovrin es un nuevo estándar en redes para la identidad digital, diseñado para llevar la confianza, el control personal y la facilidad de uso de las ID analógicas, como las licencias de conducir y las tarjetas de identificación, a internet.

### C. Fundamentos y Características de Blockchain

La arquitectura de la Blockchain da a los participantes de la red, la habilidad de compartir un libro de igual a igual (P2P), eso significa que cada participante de la red puede publicar y leer lo que los demás realizan. Cada nodo recibe y envía las transacciones hacia los otros nodos de la red y eso hace que la información este sincronizada.

#### Características

- **Consenso**  
Para que cada transacción sea válida, todos los miembros de la red tienen que ponerse de acuerdo sobre su validez.
- **Procedencia**  
Cada participante sabe de dónde viene el activo (información) y como su propiedad a cambiado con el tiempo.
- **Inmutabilidad**  
Ningún participante puede manipular una transacción después de que ha sido registrada. Si una transacción está en error, se debe utilizar una nueva transacción para revertir el error, y entonces ambas transacciones son visibles.

### D. Cómo funciona Blockchain

Blockchain elimina la necesidad de terceros al combinar dos componentes: tecnología de encriptación y protocolos de consenso. Juntos, estos, no permiten que los datos se modifiquen o eliminen, lo que hace que el fraude sea extremadamente difícil.

La tecnología de cifrado garantiza la autenticidad y la integridad de los datos que se agregarán a la cadena de bloques. Los protocolos de consenso juzgan si los nuevos datos, que están organizados en bloques, pueden unirse a la cadena de bloques. Esto proporciona el elemento de confianza distribuida del sistema.

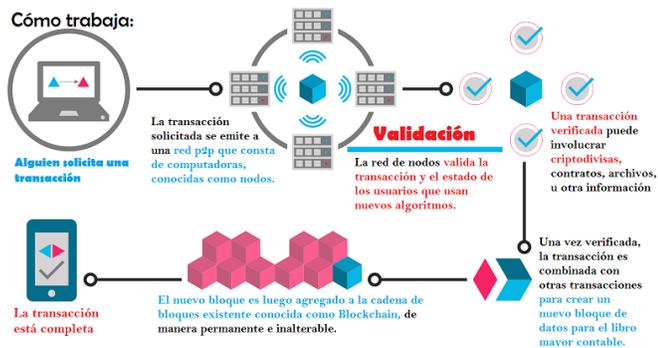


Fig IV. Cómo trabaja la Blockchain



Fig V. Representación de Escalabilidad de la Blockchain.

### E. Ventajas de Blockchain en los expedientes clínicos

Cualquier Blockchain para la digitalización de los expedientes clínicos debe de ser publica y el componente tecnológico debe de incluir 3 elementos indispensables

1. Escalabilidad
2. Seguridad
3. Privacidad

Una red de Blockchain distribuida que contiene expedientes clínicos no puede replicar toda la información a todos los participantes de la red, porque la información es dinámica y muy pesada de replicar, debido a ello la Blockchain funcionara como un manejador de control de accesos para los expedientes clínicos.

La información contenida en la red será un índice, una lista de todos los expedientes clínicos; la cual podemos visualizar como un único participante, que registrara transacciones encriptadas con el expediente clínico, la fecha en el momento que ha sido creada la transacción, el tipo de información que contiene el bloque.

La Blockchain contendrá toda la historia medica del paciente, y toda la información digitalizada (recetas médicas, radiografías, exámenes de laboratorio, etc.) se almacenará en un lago de datos (data lake)<sup>6</sup>, el cual puede almacenar una enorme cantidad de datos de cualquier tipo.

Toda la información que sea almacenada en el lago de datos será encriptada y enviada con una firma digital para asegurar la privacidad y la autenticación de la información y al mismo tiempo se creara un puntero en la Blockchain junto con el identificador del participante que lo registra para conservar la integridad entre la información

<sup>6</sup>Lago de datos (data lake) es un repositorio de almacenamiento que contienen una gran cantidad de datos en bruto y que se mantienen allí hasta que sea necesario.

### F. Implementación de Blockchain, en el gobierno de El Salvador

Actualmente la única institución del gobierno de El Salvador que se encuentra en la definición de una Blockchain estatal, es El BCR (Banco central de reservas) por medio del cual se pretende alcanzar dos objetivos:

1. El registro de transacciones a través del uso de aplicaciones de confianza.
2. Permitir esencialmente la rendición de cuentas y transparencia, mientras que también racionaliza los procesos de negocios.

El BCR lo que pretende es poner a disposición de toda la población salvadoreña, sistemas de pagos eficientes para incentivar el comercio por medio de moneda legal y criptomonedas (moneda digital de intercambio), dejando atrás el histórico rol de política monetaria centralizada.

La puesta en marcha de estas iniciativas se traduce, como cambios, que requieren la adopción de políticas internacionales en factores de procesos, costos e implementación.

Con ello el BCR impulsara, el desarrollo y la innovación en el sector financiero, obteniendo múltiples beneficios:

- Oportunidad de rastreo inmediato de dinero.
- Simplificar los procesos de liquidación, reducir la trasmisión de costos.
- Creación de registros compartidos, permitiendo identificar a cada usuario
- Lucha contra el lavado de dinero.

## V. RESULTADOS

Actualmente no se cuenta con un sistema para el manejo, organización de los expedientes clínicos de los pacientes en El Salvador y por tales motivos, Blockchain cubre completamente todos los requerimientos para un sistema digitalizado de la historia de cada paciente, con múltiples granularidades de control por el paciente, el profesional médico y el hospital. A través de la implementación que el BCR esta llevando a cabo puede realizarse una contribución que empuje, el desarrollo de la plataforma, nacional de registros médicos y con ello contribuir a la innovación y mejora de condiciones de los salvadoreños y el sistema de salud.

Proveyendo un mecanismo para registrar y mantener un historial médico completo para cada paciente y como sistema de información hospitalaria contribuye al mejor estado de salud de las personas y el desempeño de los proveedores de atención médica, lo que produce una mejor calidad, ahorro de costos y una mayor participación de los pacientes en su propia atención médica.

### Beneficios:

- Medios a prueba de manipulaciones para almacenar expedientes clínicos.
- Reducción del tiempo por consulta.
- Historial médico completo del paciente para obtener recomendaciones precisas de medicamentos por parte del cuerpo médico.
- Llevar un control de todos los servicios prestados a los pacientes.
- Fácil, obtención de estadísticas generales de los pacientes
- Detallar el coste de la atención prestada a cada paciente.

A pesar de la evidencia de estos beneficios, la utilización de los registros médicos electrónicos sigue siendo baja

## VI. CONCLUSIÓN

La tecnología de Blockchain tendrá un gran impacto en muchas industrias, con efectos importantes en la digitalización de los expedientes clínicos. La información contenida en la red será de valioso aporte para médicos, tanto en la práctica de ejercer su labor, como en la investigación de nuevos procedimientos, tratamientos para la cura de enfermedades.

Diseñar y desarrollar un sistema de información hospitalario que sea integral es uno de los puntos focales más importantes de los que depende la prestación de una muy buena asistencia sanitaria dentro de los hospitales y los diferentes tipos de instituciones médicas. Por tal motivo la importancia de poner en marcha su implementación es grande, para obtener un mejor desarrollo y beneficios para todos los ciudadanos del El Salvador.

## VII. REFERENCIAS

- [1] Strategy & is part of the PwC network, Blockchain for MENA telecom operators. New York: PwC., 2019, pp. 4-7.
- [2] Blockchain For Health Data and Its Potential Use in Health IT and Health Care Related Research (2017- 2019) [En línea]. Disponible en: <https://www.healthit.gov/sites/default/files/11-74-ablockchainforhealthcare.pdf>.
- [3] How blockchain technology can change medicine (2016 -2018) [En línea]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00325481.2018.1472996>
- [4] Norma técnica para los departamentos de estadística y documentos médicos de establecimiento de salud de primer nivel (2003 - 2019) [En línea]. Disponible en: [http://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/norma/Norma\\_estadistica\\_primer\\_nivel.pdf](http://asp.salud.gob.sv/regulacion/pdf/norma/Norma_estadistica_primer_nivel.pdf).
- [5] Cadena de bloques (2016 - 2019) [En línea]. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Cadena\\_de\\_bloques](https://es.wikipedia.org/wiki/Cadena_de_bloques).
- [6] Banco central de reserva de El Salvador (2017 - 2019); La tecnología Blockchain, Motor de crecimiento financiero y comercio [En línea]. Disponible en: <https://www.bcr.gob.sv/bcrsite/uploaded/content/category/1561689213.pdf>.

## VIII. BIOGRAFÍAS



**Mauricio Alexander Saca Menéndez** 25 años, graduado del técnico en ingeniería en ciencias de la computación de la Universidad Don Bosco, e actualmente Estudiante de ingeniería en computación en la misma Universidad, Especialista en desarrollo Java para DAI y miembro de la rama estudiantil IEEE desde el 2017, apasionado de la computación desde los 15 años investigando diversidad de temas relacionados con la tecnología de los

cuales predomino el diseño orientado a objetos, algoritmos y estructuras, matemáticas discretas y sobre todo los lenguajes de Java y JavaScript (enfoque NodeJs); amante del deporte, la lectura y los videojuegos.

# Comparativa de herramientas de maquetado como técnica de obtención de requerimientos no funcionales

Y. Rosales<sup>1, a</sup>, B. A. Olivares<sup>1, b</sup>, I. López<sup>1, c</sup>, C. Romero<sup>1, d</sup>, L. A. Reyes<sup>1, e</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Orizaba, División de Estudios de Posgrado e Investigación

<sup>a</sup> rosalesy@acm.org, <sup>b</sup> bolivares@ito-depi.edu.mx, <sup>c</sup> ilopez@ito-depi.edu.mx, <sup>d</sup> crrometo@ito-depi.edu.mx, <sup>e</sup> l.a.reyes@gmail.com

**Resumen**— Contar con una buena definición de requerimientos funcionales y no funcionales de un sistema disminuye el riesgo de incumplir las expectativas del usuario final; sin embargo, en ocasiones no se cuenta con la presencia del usuario, por ejemplo cuando se desarrollan herramientas de apoyo a la Ingeniería de Software. En este trabajo se aborda la obtención de los requerimientos funcionales y no funcionales para un Módulo de Maquetado de Formularios de un Generador de Aplicaciones Enriquecidas; al no contar con un usuario final que determine los requerimientos a incluir se recurre a técnicas de análisis comparativo para determinar las funcionalidades que tienen en común herramientas equivalentes y con ello acotar los requerimientos del propio módulo.

*Palabras clave.* Requerimientos, Maquetado, Funcionalidades, Análisis.

## 1. Introducción

Cuando se desarrolla una aplicación de software es deseable seguir una metodología que sirva de guía durante el proceso; casi todas las metodologías de desarrollo de software indican como una de las primeras fases el reunir información con respecto a lo que se espera que la aplicación realice, dicha información se recolecta mediante reuniones con el cliente y con los usuarios que van a utilizar la aplicación o bien mediante la aplicación de encuestas a los usuarios potenciales identificados. Con esa información los analistas obtienen requerimientos funcionales y no funcionales a cubrir en la aplicación.

Entre las aplicaciones de software se consideran también las herramientas que apoyan al desarrollo de software, donde los usuarios son a su vez desarrolladores; por ejemplo, una técnica de Ingeniería de Software es el Desarrollo Dirigido por Modelos (MDD por sus siglas en inglés) que se basa en el uso de modelos que lleven a generar código y otros artefactos de software. Los modelos tienen la capacidad de describir gráficamente un sistema desde una perspectiva particular omitiendo detalles irrelevantes, así la identificación de características importantes se vuelve más evidente; además, gracias a su notación visual, un modelo es más entendible para los desarrolladores y al mismo tiempo es interpretable por las máquinas; por lo que resulta importante construir herramientas de apoyo que transformen modelos en código, sobre todo en el caso de nuevos estándares de modelado como IFML (*Interaction Flow Modeling Language*, Lenguaje de Modelado de Flujo de Interacciones) [1].

IFML se centra en describir gráficamente la interacción entre un usuario y la interfaz gráfica (GUI) de un sistema,

hace énfasis en representar claramente las acciones del usuario y las reacciones del sistema en, por ejemplo, una pantalla, dejando de lado elementos funcionalmente irrelevantes (como la distribución de los controles de captura en una página por ejemplo) pero que resultan de suma importancia para la aceptación de la aplicación por parte del usuario final. El Generador de Aplicaciones Enriquecidas de Internet [2] transforma modelos IFML en código en tres posibles combinaciones de lenguajes, pero deja de lado las características visuales mencionadas precisamente porque los modelos IFML no las incluyen.

De lo anterior deriva la necesidad de crear un módulo de maquetado de formularios para cubrir el aspecto visual que IFML no considera e integrarlo al Generador de Aplicaciones Enriquecidas de Internet (RIAs) [2]; la creación del generador estuvo dirigida por las características funcionales pero el módulo de maquetado, por su naturaleza visual, necesita cubrir otros requerimientos. Si bien cada desarrollador de software es un usuario potencial del generador y tiene en mente los requerimientos que debe cubrir una herramienta de este tipo, estas ideas están sesgadas por la experiencia específica de desarrollo de cada uno (tecnologías que conoce, años de experiencia, tipo de aplicaciones que ha desarrollado) por lo que se hace necesario contrastar dichas ideas con lo que existe en el mercado actual y obtener los requerimientos de una manera más formal pese a no contar con usuarios finales específicos. El utilizar manuales de usuario de herramientas semejantes como una alternativa a la definición de requerimientos se presenta en el libro “The Dead Line” [3], explicación novelada de las ideas de Tom DeMarco respecto a la administración de proyectos de software; con esto en mente, en el presente trabajo se optó por recurrir a técnicas de análisis comparativo sobre un conjunto de herramientas que permiten el maquetado de aplicaciones y adaptar las características y funcionalidades identificadas a las necesidades del Generador de RIAs para desarrollar el módulo de maquetado.

## 2. Parte técnica del artículo

El Generador de RIAs se alimenta de modelos IFML y UML (*Unified Modeling Language*, Lenguaje Unificado de Modelado) así como de una serie de elecciones del usuario (combinación de lenguajes de salida, estilo visual de la aplicación); el modelo IFML contiene toda la información de las páginas, formularios, controles y conceptos de dominio

que conforman la aplicación a generar mientras que el modelo UML contiene información de clases (equivalentes a las que existen en el modelo de dominio en IFML); el generador analiza los archivos XML (*Extensible Markup Language*, Lenguaje de Marcado Extensible) que representan los modelos y construye una Representación Intermedia (RI), independiente de la combinación de lenguajes de salida, con los elementos y características programables encontrados en los modelos; finalmente, toma la RI y la transforma en código final en la combinación de lenguajes elegida y con el estilo visual seleccionado por el usuario. El módulo de maquetado entonces tiene que incluirse antes de la generación del código final y después de contar con la RI completa.

El proceso esperado del módulo de maquetado es el siguiente: 1) recibir la RI, 2) obtener la información de formularios y controles modelados a partir de la RI, 3) permitir que el usuario distribuya los controles de los formularios como mejor considere y 4) reflejar la distribución realizada por el usuario en el código resultante. Algunos requerimientos que se tenían presentes, más allá de consideraciones particulares de usuarios, eran que: 1) la distribución de controles preferentemente debía ser a través de arrastrar y soltar elementos, 2) como existen elementos en IFML que tienen más de una representación visual en las tecnologías de salida se debía considerar el cambio de visualización de ciertos controles, 3) permitir el cambio del texto de las etiquetas de los controles ya que el generador considera dichas etiquetas como identificadores en el código y usarlas directamente llevaba a presentar errores ortográficos en las pantallas en el idioma español y 4) que debía ser codificado en JavaFX porque permite el desarrollo de aplicaciones con alta demanda visual, de interacción y es compatible con el lenguaje en que se desarrolló el generador.

Las necesidades anteriores se identificaron rápidamente pero los requerimientos completos del módulo de maquetado necesitaban un mayor detalle y no se contaba con un número significativo de usuarios potenciales disponibles que además contarán con una experiencia de desarrollo diversa, así que se realizó un análisis comparativo de distintas herramientas que permitieran el maquetado de aplicaciones de Escritorio, Web y Móviles, para identificar sus características y obtener las funcionalidades comunes de ellas para adaptarlas al módulo de maquetado.

#### A. Desarrollo

Las herramientas que se seleccionaron para realizar el análisis comparativo fueron: 1) Balsamiq Mockup que modela aplicaciones Webs y Móviles, 2) *Plugin Felipe* para Sketch que modela aplicaciones Móviles, 3) UXPin que modela aplicaciones Móviles, 4) *Plugin JFormDesigner* para NetBeans que modela aplicaciones de escritorio, 5) Visual Paradigm UX Wireframe que realiza el maquetado de aplicaciones Web y Móviles en Visual Paradigm y 6)

Microsoft Visual Studio para el desarrollo de aplicaciones Web que incluye una herramienta de maquetado de páginas Web. La selección se realizó porque cumplen con las siguientes condiciones: a) el diseño visual de aplicaciones se realiza por medio de una interfaz gráfica de usuario (GUI), b) la distribución de componentes se hace en un espacio de trabajo predeterminado, c) los elementos visuales se seleccionan de un conjunto, d) generan código de algún tipo y e) son de uso gratuito o al menos cuentan con un periodo de prueba o videos de uso que permiten evaluar sus características de trabajo.

A continuación se describen brevemente las herramientas seleccionadas:

#### I. Balsamiq Mockup [4]

Es una herramienta capaz de crear *wireframes*; un *wireframe* es el equivalente al esqueleto o estructura de un sitio Web o aplicación, se usa para describir el contenido de páginas o formularios que tienen por omisión y elementos que permitan ver las funcionalidades, tales como botones y ligas pero sin considerar la navegación.

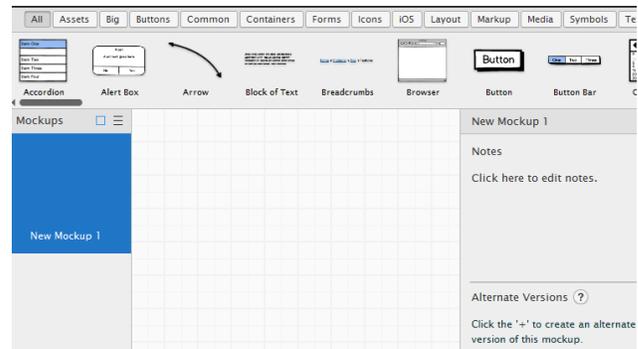


Fig. 1 GUI de Balsamiq Mockup

*Balsamiq Mockup* permite representar visualmente y de forma simple una aplicación Web o Móvil centrándose sólo en la distribución de componentes sin entrar en el detalle de éstos, es fácil de usar para un usuario no desarrollador ya que cuanta con elementos intuitivos que son posibles arrastrar y soltar en el área de maquetado para lograr el diseño deseado (Fig. 1); se trata de una herramienta muy completa para el maquetado pero sólo permite exportar el resultado en PDF, PNG y genera código JSON (*JavaScript Object Notation*). *Balsamiq Mockup* tiene costo y cuenta también con una versión de prueba, que no deja de funcionar una vez terminado el periodo pero entonces no permite guardar el maquetado.

#### II. Felipe [5]

*Felipe* es un *plugin* para la herramienta Sketch que permite el maquetado de aplicaciones Móviles y es compatible únicamente con Mac. Este *plugin* cuenta con una peculiaridad en la forma de asignar los controles al área de

maquetado, además de contar con una barra de controles para arrastrarlos y soltarlos, también permite al usuario dibujarlos con formas simples en el área de maquetado y estas formas se convierten en el componente que se desea agregar. Esta herramienta permite exportar un archivo CSS (*Cascading Style Sheets*, Hojas de Estilo en Cascada) para obtener el diseño de la aplicación.

La GUI de Felipe cuenta con amplios espacios de trabajo, a la izquierda tiene una lista con los componentes disponibles y a la derecha un espacio para manipular las propiedades de esos componentes como se muestra en la Fig. 2. El plugin es gratuito pero Sketch no.

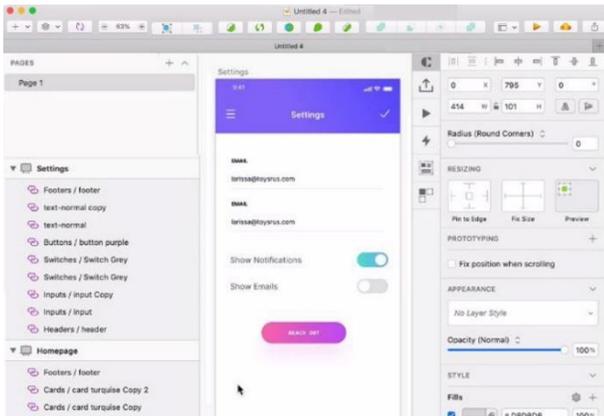


Fig. 2 GUI del PlugIn de Felipe

## II. UXPin [6]

Esta herramienta se ejecuta en la nube, lo que permite trabajar de manera colaborativa desde cualquier lugar. Es capaz de maquetar para cualquier dispositivo (Escritorio, Tablet, Móvil). Lo que hace diferente a UXPin de las demás herramientas es que integra controles con pequeños bloques de código que les dan interactividad a los elementos del prototipo, a partir del código HTML (*HyperText Markup Language*, Lenguaje de marcas de hipertexto) que se genera. Esto último permite que la aplicación diseñada sea más real y manipulable. En la Fig. 3 se muestra la GUI de UXPin.

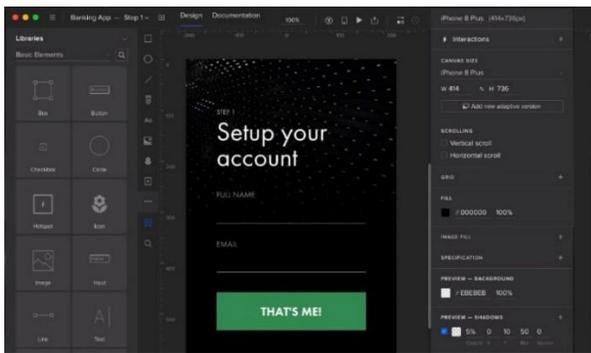


Fig. 3 GUI de UXPin

Del lado izquierdo se encuentra la lista de controles, mismos que se pueden arrastrar y soltar a la zona de maquetado (centro), sus propiedades se editan en la sección que se encuentra a la derecha. El resultado del maquetado se exporta a PNG, PDF o HTML.

## IV. JFormDesigner [7]

Es un *plugin* de NetBeans capaz de maquetar interfaces de usuario de forma sencilla para aplicaciones de escritorio en Java Swing. En la Fig. 4 se muestra la distribución de esta herramienta, a la derecha se sitúa un listado de componentes para maquetar que se clasifican según su tipo y permite arrastrarlos y soltarlos para diseñar la interfaz en el área de maquetado situada en la parte media y a la izquierda se encuentra un panel de opciones para modificar las propiedades de los componentes; esta distribución puede cambiar según el gusto del usuario. Este maquetado genera código fuente en tiempo real en Java.

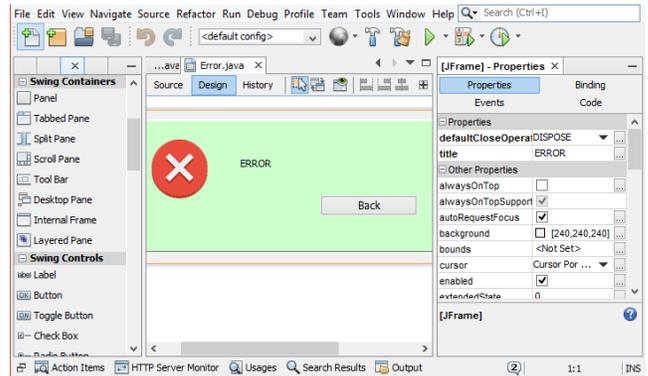


Fig. 4 GUI de JFormDesigner

## V. Visual Paradigm UX Wireframe [8]

*UX Wireframe* es una herramienta para Visual Paradigm que permite realizar *WireFrames* de aplicaciones Webs y Móviles. Con esta herramienta se crean diseños de aplicaciones a través del maquetado, permite presentar un flujo de los modelos realizados por medio de narrativas y asignarles animaciones.

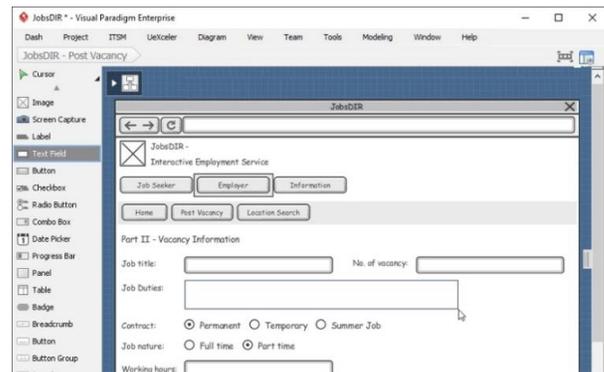


Fig. 5 GUI de Visual Paradigm UX

La lista de componentes está ubicada a la izquierda y permite arrastrarlos hasta la el área de maquetado que es el resto de la pantalla tal y como se muestra en la Fig. 5; las propiedades se manipulan con el clic derecho sobre dicho control ubicado en la pantalla. No genera ningún tipo de código a partir del maquetado.

### VI. Microsoft Visual Studio (MVS) [9]

MVS para desarrollo en la Web incluye una herramienta que permite el maquetado de la interfaz de una aplicación. En la Fig. 6, se muestra a la izquierda una sección con la lista de componentes disponibles, en la esquina inferior de la derecha una lista de propiedades que modifican los atributos de las etiquetas de los componentes seleccionados, en medio se tiene el área de maquetado y la generación de código a la medida en ASP.NET. La distribución de estas secciones puede variar.

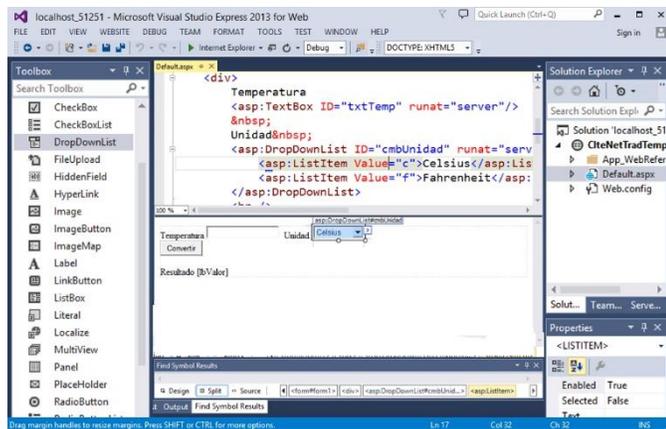


Fig. 6 GUI de MVS

### B. Análisis comparativo

Después de revisar las características de las herramientas de maquetado analizadas se realizaron una serie de tablas comparativas, tomando como criterios de comparación: características de distribución de interfaz gráfica de usuario (GUI), las acciones que permiten realizar sobre los objetos que maquetan, los mecanismos de distribución con respecto a elementos que permiten maquetar y si permiten o no la generación de código ejecutable.

La TABLA I muestra la comparativa de la interacción de las herramientas analizadas donde se identificó que la interacción más común con este tipo de aplicaciones es el permitirle al usuario que a partir de una lista de componentes, con el ratón, arrastre el componente y lo suelte en el área de maquetado.

TABLA I. INTERACCIÓN AL MAQUETAR

Tipo de Interacción	Arrastrar y soltar elementos	Dibujar los elementos
Herramienta	[4] [6] [7] [8] [9]	[5]

La TABLA II muestra el mecanismo con el que cuentan estas herramientas para distribuir los controles dentro del área de maquetado. En esta comparativa se observa que el formato vertical es el más usado, esto es porque las herramientas [5] y [6] maquetan para aplicaciones móviles y la [9] para aplicaciones Web pero sin alguna distribución en específico a menos que se indique y se apliquen divisiones (div) o tablas; después de eso están las herramientas que maquetan sin restricción alguna permitiéndole al usuario posicionar los controles en cualquier espacio aunque esto no sea posible de implementar en código para Web [4] [8]. Finalmente se tiene la herramienta [7], que permite la asignación de gestores de diseño, uno de ellos es la asignación de un *Grid* (cuadrícula) que se determina por la asignación de un número de filas y columnas.

TABLA II. DISTRIBUCIÓN PARA EL ÁREA DE MAQUETADO

Distribución	Sin restricción	Formato vertical	Gestores de diseño
Herramienta	[4] [8]	[5] [6] [9]	[7]

La TABLA III muestra la orientación de la distribución gráfica de secciones que tiene cada una de las herramientas. Si bien la mayoría de ellas permite reacomodar las secciones, esta comparativa demuestra que comparten una distribución inicial determinada de sus elementos en la interfaz gráfica.

TABLA III. DISTRIBUCIÓN DE LA GUI

Herramienta	Izquierda	Centro	Derecha	Arriba
[4]	Lista de maquetados	Área de maquetado	Panel de propiedades	Lista de componentes
[5]	Lista de componentes	Área de maquetado	Panel de propiedades (se intercambia con componentes a medida que se maquetan)	Acciones comunes de edición
[6]	Lista de componentes	Área de maquetado	Panel de propiedades	-----
[7]	Lista de componentes	Área de maquetado	Panel de propiedades	Acciones comunes de edición
[8]	Lista de componentes	Área de maquetado	-----	-----
[9]	Lista de componentes	Área de maquetado	Panel de propiedades	Acciones comunes de edición

La TABLA IV muestra la comparativa del tipo de código que las herramientas son capaces de generar después de haber realizado el maquetado de una aplicación.

TABLA IV. CÓDIGO QUE SE GENERA

Código	Java	ASP.NET	JSON	HTML/CSS	Ninguno
Herramienta	[7]	[9]	[4]	[5] [6]	[8]

Dos de las herramientas analizadas generan código para un lenguaje de programación específico ([7], [9]), tres generan código sólo de la parte visual de la aplicación ([4], [5] y [6]) mientras que [8] no genera código alguno.

### C. Requerimientos funcionales y no funcionales identificados

Una vez realizada la comparación de herramientas, se analizaron los resultados que quedaron plasmados en las tablas anteriores. Esto permitió identificar comportamientos parecidos en varias de las herramientas, mismos que se pueden entender como mejores prácticas para el maquetado. Con esto en mente y las expectativas del módulo descritas en la sección 2, se eligieron las siguientes características para incorporarse a los requerimientos específicos.

**Interacción:** Arrastrar y soltar los elementos de la lista de controles hacia el área de maquetado.

**Posicionamiento:** La distribución de la GUI tal y como se muestra en la Fig. 7 contará con cuatro secciones importantes, a la izquierda, la lista de formularios disponibles y la lista de controles ambas derivadas de la RI; en la parte superior, una serie de botones que permiten realizar acciones sobre el maquetado; en el resto de la pantalla, el área de maquetado. En el caso de propiedades, que muchas de las herramientas permiten editar del lado derecho, en el módulo de maquetado solo se tienen consideradas dos: el cambio de etiqueta y el cambio de tipo de control (para algunos casos) por lo que será implementada con un menú flotante como lo realiza Visual Paradigm.

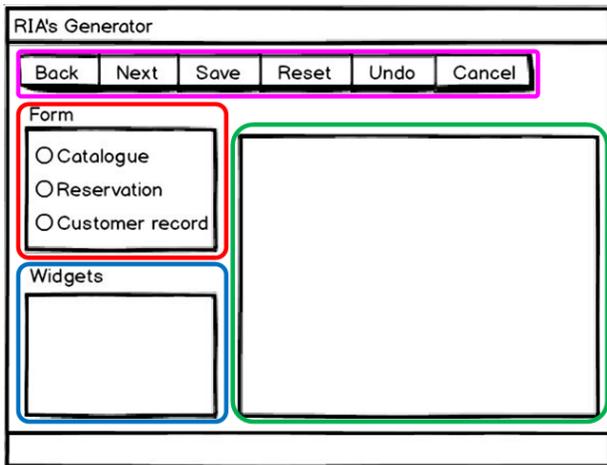


Fig. 7 Distribución de la GUI del módulo de maquetado

**Distribución:** Se hará la distribución de controles por medio de un *Grid* de tamaño variable determinado por el usuario, característica tomada de los gestores de diseño de NetBeans.

**Código que genera:** Después de maquetar los formularios el generador entrega código en una de tres combinaciones de lenguajes a petición del usuario: a) Java Serverfaces con PrimeFaces, b) PHP con jQuery y c) PHP con AngularJS.

A partir de las características descritas en los párrafos anteriores se determinaron los requerimientos funcionales y no funcionales a cumplir dentro del módulo de maquetado, mismos que se enlistan a continuación:

#### Requerimientos funcionales

- Seleccionar un formulario
  - Presentar formulario existente: mostrar los controles del formulario ya maquetados.
  - Seleccionar distribución: cuando el formulario no ha sido maquetado previamente, permitir al usuario indicar la cantidad de columnas y renglones del *grid* así como la posición que tendrán las etiquetas (arriba o a la izquierda del control).
- Bosquejar formulario
  - Posicionar controles: de los controles asociados al formulario, de acuerdo al modelo, arrastrarlos a la sección de maquetado y soltarlos en la celda que el usuario desee.
  - Cambiar tipo de control: para el caso de selecciones únicas o selecciones múltiples, permitir que el usuario indique, mediante un menú flotante, si desea mostrar el control como lista desplegable, lista desplegada o lista de radios en el primer caso o bien como lista desplegada o lista de cajas de marcado (*checkboxes*) en el segundo.
  - Modificar etiquetas: permitir que el usuario indique, mediante un menú flotante y un diálogo, el valor de la etiqueta que acompaña al control asegurando que no se afecta el identificador interno de la generación de código.
  - Re-posicionar controles: dentro del área de maquetado, permitir que un control cambie de lugar.
  - Guardar cambios: almacenar el maquetado del formulario para verlo posteriormente.
  - Rehacer un formulario: eliminar el maquetado de un formulario, regresándolo a su estado original.
- Cancelar cambios: deshace el maquetado de todos los formularios, regresando el módulo al estado inicial.
- Deshacer acciones: elimina la última acción realizada (posicionar un control, cambiar una etiqueta, cambiar la visualización de un control, etc.).
- Generar código: refleja el maquetado realizado en la creación de código que realiza el generador. En caso de que un formulario no hubiese sido maquetado, se le genera una distribución por omisión (dos columnas, en la columna de la izquierda van las etiquetas y en la columna de la derecha van los controles).

## Requerimientos no funcionales

- La parte funcional requiere posicionar los controles, la parte no funcional se hará con el ratón para arrastrar y soltar controles: mover, con ayuda del ratón, los controles desde la lista de elementos disponibles hasta el área de maquetado y dentro de ésta.
- Distribución de secciones en la GUI del módulo
  - Barra menú (en rosa en la Fig. 7)
  - Sección de lista de formularios (en rojo en la Fig. 7)
  - Sección de lista de controles (en azul en la Fig. 7)
  - Sección de maquetado (en verde en la Fig. 7)
- Distribución de controles a través de una cuadrícula (*Grid*)
- Los controles y sus etiquetas son colocados en pares
- La posición de las etiquetas será de dos formas, a la izquierda o arriba de su control
- La distribución de un formulario será por omisión si no se maquetó
- Se maquetó únicamente la distribución de controles de formularios
- El módulo funcionará solo con el periférico del ratón

## 3. Conclusiones

Cuando en la etapa de análisis no se cuenta con la participación directa del usuario, es necesario recurrir a otras técnicas que permitan la obtención de requerimientos. Llevar a cabo análisis comparativos de herramientas que realicen funciones similares a las que se esperan del módulo a desarrollar resulta una técnica muy útil para identificar o complementar los requerimientos.

En el mercado hay muchas herramientas que hacen el maquetado de aplicaciones en diversos contextos, el análisis realizado permitió obtener un listado de funcionalidades comunes entre este tipo de aplicaciones que ayudó a formalizar los requerimientos del módulo; sin embargo, las herramientas analizadas no hacen uso de modelos de Ingeniería de Software como sí lo hace el Generador de RIAs, con lo que se comprueba la utilidad de este trabajo.

## D. Trabajos a futuro

Una vez determinados los requerimientos funcionales y no funcionales del Módulo de Maquetado se va a construir una arquitectura robusta, capaz de soportar el desarrollo de los requerimientos identificados de acuerdo a las características particulares de JavaFx. También se tiene, como trabajo a futuro, la integración del Módulo de Maquetado con el Generador RIAs.

## E. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por permitir el desarrollo de este proyecto.

## 4. Referencias

- [1] M. Brambilla y P. Fraternali, *Interaction Flow Modeling Language: Model-Driven UI Engineering of Web and Mobile Apps with IFML*. Morgan Kaufmann, 2014.
- [2] S. Estévez, “Desarrollo de un generador de Aplicaciones Enriquecidas de Internet modeladas bajo el patrón arquitectónico MVC usando UML e IFML”, Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, 2018.
- [3] T. DeMarco, *The deadline: a novel about project management*. Dorset House Pub., 1997.
- [4] Balsamiq Studios, LLC, “Balsamiq Wireframes”, *Balsamiq Wireframes*. [En línea]. Disponible en: <https://balsamiq.com/wireframes/>. [Consultado: 04-mar-2019].
- [5] “Felipe - Turn wireframes into UI”. [En línea]. Disponible en: <http://arielverber.com/felipe>. [Consultado: 12-mar-2019].
- [6] “UXPin - The Premier UX Design Platform”. [En línea]. Disponible en: <https://www.uxpin.com/>. [Consultado: 12-mar-2019].
- [7] “JFormDesigner - detalle del complemento NetBeans”. [En línea]. Disponible en: <http://plugins.netbeans.org/plugin/39703/jformdesigner>. [Consultado: 13-mar-2019].
- [8] “Diseño de UX rápido y herramientas de estructura alámbrica”. [En línea]. Disponible en: <https://www.visual-paradigm.com/features/ux-design-and-wireframe-tools/>. [Consultado: 18-mar-2019].
- [9] “Herramientas web modernas | Visual Studio”, *Visual Studio*. [En línea]. Disponible en: <https://visualstudio.microsoft.com/es/vs/features/web/>. [Consultado: 18-mar-2019].

## 5. Biografías

Yasmin Rosales-Cruz: Estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales, egresada del Instituto Tecnológico de Orizaba.

Beatriz Olivares-Zepahua: Maestra en Comercio Electrónico, imparte clases en la Maestría en Sistemas Computacionales de la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el Instituto Tecnológico de Orizaba.

Ignacio López-Martínez: Maestro en Telecomunicaciones, imparte clases en la Maestría en Sistemas Computacionales de la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el Instituto Tecnológico de Orizaba.

Celia Romero-Torres: Maestra en Sistemas Computacionales, imparte clases en la Maestría en Sistemas Computacionales de la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el Instituto Tecnológico de Orizaba.

Luis Reyes-Hernández: Maestro en Sistemas Computacionales, imparte clases en la Maestría en Sistemas Computacionales de la División de Estudios de Posgrado e Investigación en el Instituto Tecnológico de Orizaba.

# Redes neuronales de tercera generación como alternativa a Algoritmos Genéticos en el problema del camino más corto

E. Cumplido<sup>a</sup>, M. Mejía<sup>b</sup>, G. Reyes<sup>c</sup>, D. Mújica<sup>d</sup>

Tecnológico nacional de México / CENIDET

<sup>a</sup> edgar.rodriguez18ca@cenidet.edu.mx, <sup>b</sup> mlavalle@cenidet.edu.mx, <sup>c</sup> greyes@cenidet.edu.mx, <sup>d</sup> dantemv@cenidet.edu.mx

**Resumen**— En este artículo se aborda el problema del camino más corto, este problema si bien ya cuenta con una gran historia de investigación y una múltiple cantidad de aplicaciones, sigue siendo un tema de gran importancia en diversas áreas.

La propuesta principal del artículo es una red neuronal de tercera generación para abordar el problema del camino más corto, la cual demostró ser bastante eficiente en cuestión de tiempos de ejecución y la obtención de resultados óptimos a comparación de otras técnicas encontradas en la literatura.

Se realizó una comparativa en términos de tiempo y cantidad de nodos, entre una red neuronal pulsante y un Algoritmo Genético bastante utilizado en la literatura para abordar no solo el problema del camino más corto, si no también problemas de optimización más complejos.

Los resultados comprobaron que una red neuronal pulsante, debido a su paralelismo, obtiene la respuesta óptima en una fracción de tiempo sobre el Algoritmo Genético, sin embargo, su implementación paralela puede presentar algunos inconvenientes.

**Palabras clave.** Redes neuronales artificiales, Red neuronal pulsante, Red neuronal de tercera generación, Algoritmos genéticos, Problema del camino más corto.

## 1. Introducción

### A. Problema del camino más corto y aplicaciones

El problema del camino más corto se podría considerar una variante del problema del agente viajero. El único objetivo en este problema es encontrar la ruta más corta de un punto o nodo *A* hasta un punto *B*, la ruta se calcula a partir de un grafo ponderado [1].

En la Fig. 1 podemos observar un ejemplo de un grafo ponderado, con 9 nodos y 12 conexiones entre los nodos.

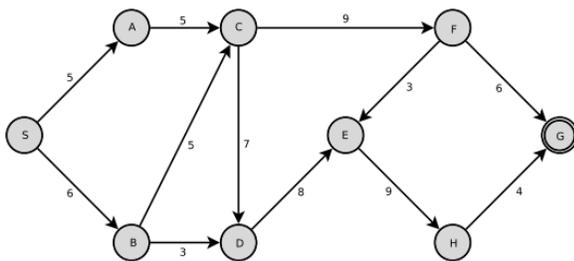


Fig. 1. Grafo ponderado [1]

Es importante destacar que el problema de encontrar la ruta más corta se clasifica dentro del conjunto de los problemas no polinomiales (NP).

Si bien es uno de los problemas más cotidianos que podemos encontrar y que además tiene una infinidad de aplicaciones en muchas áreas. Por mencionar unos ejemplos conocidos; Cálculo de ruta en Google Maps, encontrar la solución a un cubo de Rubik con el menor número de movimientos, o en redes computacionales y telecomunicaciones para la función de enrutamiento, entre otras aplicaciones [2].

Existe una gran variedad de aplicaciones en la búsqueda del camino más corto, y a su vez existe una amplia variedad de algoritmos capaces de resolver este problema (Por ejemplo, Dijkstra, Bellman-Ford, A\*, Floyd-Warshall, Branch & Bound, entre otros) [3].

Así como ocurre en otros problemas computacionales, cada algoritmo tiene sus ventajas y desventajas frente a otros. Es importante saber qué es lo que se quiere realizar para poder utilizar el algoritmo correcto, dentro de los factores que podemos considerar es si deseamos rapidez, eficacia, una o varias propuestas de ruta, menor costo en recursos computacionales, entre otros aspectos [2].

Se ha comprobado y la literatura nos indica que los algoritmos propios de inteligencia artificial resultan ser bastantes competitivos en cuestión de tiempo para encontrar una solución, contra la mayoría de los algoritmos clásicos.

### B. Representación del problema

En la literatura podemos encontrar diferentes formas de interpretar el problema de la búsqueda del camino más corto. Específicamente en cómo realizar la codificación de un grafo es crítico para el desarrollo del algoritmo que se utilizará (En este artículo se utilizará redes neuronales de tercera generación y un Algoritmo Genético). Algo importante es que para el problema de la ruta más corta no es fácil encontrar una representación natural [4].

## 2. Propuesta de solución

En esta Sección se presenta el proceso que se realizó para llegar a los resultados presentados para resolver el problema de la ruta más corta, es decir, de menor costo entre dos nodos. Se muestra la representación del problema, la red neuronal utilizada y el Algoritmo Genético utilizado.

### A. Representación del problema

La representación del problema de búsqueda de camino más corto requiere una técnica que se permita aplicar tanto a la red neuronal de tercera generación y al Algoritmo Genético.

Una técnica correcta nos permitirá comparar el comportamiento de los algoritmos entre sí [1].

Una forma sencilla computacionalmente, y la cual se utilizó en este artículo, es la representación mediante una matriz de adyacencia [5].

Supongamos que tenemos un espacio de 5 nodos, entre cada nodo existe un costo (Lo cual representa un grafo ponderado), la representación se muestra en la Tabla I:

TABLA I. TABLA DE ADYACENCIA PARA UN GRAFO DE 5 NODOS

	A	B	C	D	E
A	0	2	7	3	5
B	2	0	5	8	4
C	7	5	0	2	6
D	3	8	2	0	4
E	5	4	6	4	0

Si observamos detenidamente la matriz contiene una diagonal de ceros, estos ceros representan los costes hacia sí mismo, es decir, si queremos ir del nodo A al nodo A, entonces el costo es de 0, ese mismo caso es aplicado de igual manera a los demás nodos. Una condición importante debe ser que la matriz sea  $n \times n$ ; Donde  $n$  es el número de nodos [6].

### B. Complejidad del problema

Para recalcar la dificultad, veremos algunos ejemplos de las posibles combinaciones de escenario. Si bien para un humano sería prácticamente imposible (considerando un tiempo polinomial), calcular la ruta óptima sobre un espacio de búsqueda que contenga un millón de nodos, e inclusive con 9,000 nodos la tarea sigue siendo bastante compleja, pero afortunadamente los algoritmos para búsqueda de caminos nos facilitan este trabajo [7].

A continuación, se muestran algunas representaciones gráficas de casos para el problema del camino más corto, las Fig. 2 y 3 fueron generadas a partir de las matrices de adyacencia utilizadas para la fase de experimentación del artículo. Las figuras se generaron en MATLAB con las funciones de ploteo para grafos.

En las matrices de adyacencia utilizadas no se realizaron grafos con conexiones de todos los nodos contra todos (grafo completo), algunos caminos fueron eliminados de forma aleatoria con una probabilidad del 50%.

Como podemos observar en la Fig. 2, siendo un grafo de 50 nodos, ya existe una cantidad importante de conexiones (Las máximas conexiones posibles son 2,500).

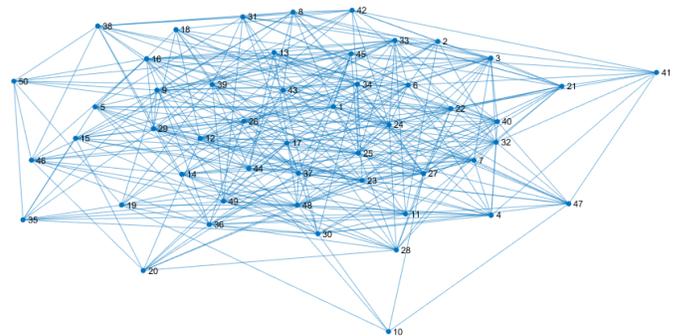


Fig. 2. Representación gráfica de los enlaces entre nodos, de un grafo de 50 nodos.

Ahora bien, si visualizamos únicamente un grafo de 200 nodos como el de la Fig. 3, se logra apreciar que el número de conexiones crece exponencialmente (Con un máximo de 40,000 conexiones).

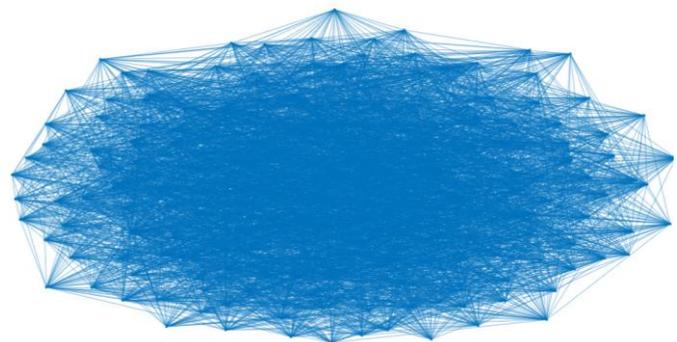


Fig. 3. Representación gráfica de los enlaces entre nodos, de un grafo de 200 nodos.

Para ejemplificar la dimensión del problema, un grafo con 9,000 nodos tendría un máximo de 81,000,000 de conexiones.

### C. Red neuronal pulsante

La tercera generación de redes neuronales contiene diferentes modelos, en este artículo se utilizó una Red Neuronal Pulsante (RNP) para resolver el problema del camino más corto [1].

Una de las principales diferencias de una RNP contra las dos generaciones anteriores es que son un paradigma en el cual las neuronas son activadas no solamente por valores numéricos, sino que además son activadas por pulsos o señales externas que dependen del tiempo.

La RNP es implementada en un modelo que requiere de una neurona por cada elemento de procesamiento [3].

La arquitectura de la RNP es la siguiente:

- a) **Módulo dendritas;** Es mediante el cual entra la información circundante a la RNP.
- b) **Módulo de encadenamiento;** Une la información de entrada con la de salida
- c) **Generador de pulsos;** Contiene un umbral dinámico que se basa en el proceso interno de la misma RNP.

Una particularidad de las RNP es que en cierto grado la actividad de una neurona afecta a sus neuronas vecinas, esto genera un efecto de auto onda, este proceso se muestra en la Fig. 4, a partir de una imagen con un cuadrado.

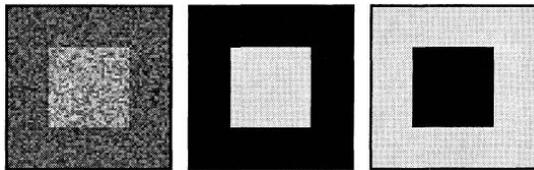


Fig. 4. Salidas de una red neuronal pulsante, cada una demuestra el efecto de auto onda [1]

La Fig. 5, representa el modelado de cada neurona (Dado un problema de  $n$  nodos, la red tendrá  $n \times n$  neuronas), cada neurona recibe de entrada información de la matriz de adyacencia ( $W$ ), también recibe un valor del costo adicional ( $F$ ) en caso de continuar por alguna ruta, sumando  $W$  y  $F$  se obtiene el valor del costo total incurrido por algún camino hasta un momento dado ( $U$ ), el cual es determinado por el umbral dinámico ( $E$ ). En cada época el valor de  $E$  se incrementa por un valor constante. Si el costo acumulado en  $U$  es igual o mayor al umbral dinámico, entonces se activa la neurona tomando la salida ( $Y$ ) y el valor de "1", en caso contrario la salida es de "0".

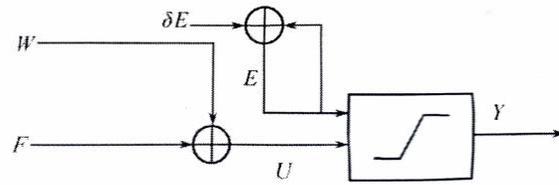


Fig. 5. Modelo de una red neuronal pulsante, Auto-Wave Neural Network [1].

De forma resumida, se utilizaron las siguientes ecuaciones para el comportamiento de la neurona AWNN:

$$\Delta F_{actual} = W_{anterior, actual} \quad (1)$$

$$U_{actual, actual} = F_{actual} + W_{actual, actual} \quad (2)$$

$$Si U > E; Y = 0; Y = 1 \quad (3)$$

$$\Delta E = \delta E \quad (4)$$

Donde  $\delta E$  es un valor constante, en este caso se inicializó con valor de 1.

### D. Algoritmo Genético

Dentro de los algoritmos comprendidos por la computación evolutiva, se encuentran los Algoritmos Genéticos, estos están basados en el proceso genético de los organismos vivos. Basándose en que, a lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de selección natural y la supervivencia de los más fuertes [10].

Los Algoritmos Genéticos imitan ese comportamiento, y son capaces de ir creando soluciones para aplicaciones reales. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de estas.

En la literatura podemos encontrar diferentes variantes del Algoritmo Genético, así como diferentes opciones en cada una de las etapas (Por ejemplo, para el cálculo de aptitud), pero la versión simple del Algoritmo Genético consta de las fases representadas en la Fig. 6 [9]:

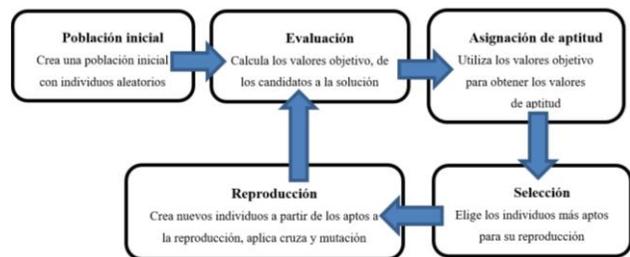


Fig. 6. Iteración básica de los Algoritmos Genéticos

### E. Experimentación y resultados

La implementación de los algoritmos se realizó en *MATLAB 2019a*. Para ejecutar los diferentes casos, se generaron diferentes matrices de adyacencia, y para ser parciales, las mismas matrices de adyacencia se aplicaron a ambos algoritmos. Para la generación de las matrices de adyacencia se utilizó una probabilidad del 50% para eliminar caminos entre nodos, y así no tener un grafo más denso.

A continuación, se muestran unas tablas de resultados con respecto a los tiempos de ejecución de cada algoritmo, considerando aspectos como el paralelismo en la red neuronal.

TABLA II. TABLA DE TIEMPOS (SEGUNDOS) CON RESPECTO AL ALGORITMO GENÉTICO.

Número de nodos	Tiempo de ejecución	Parámetros	
		Tamaño Población	Tamaño Cromosoma
9,000	5.6708	1000	800
	7.5471	900	700
	11.0237	500	400
	13.0598	350	300
	16.2350	120	50

TABLA III. TABLA COMPARATIVA DE TIEMPOS (SEGUNDOS) CON DIFERENTE CANTIDAD DE NODOS

Número de nodos	Red neuronal pulsante		Algoritmo genético	
	Sin paralelismo	Paralelismo	Máx.	Min.
50	0.001625	0.0000325	0.128	0.986
100	0.0034	0.0000340	0.154	0.127
200	0.0252	0.0001260	0.217	0.198
400	0.070426	0.0001761	0.342	0.281
1,000	4.87422	0.0048742	0.8597	0.534
2,000	6.9748	0.0034874	1.154	0.827
3,000	11.0739	0.0036913	1.725	1.452
4,000	15.6580	0.0039145	2.411	2.286
5,000	25.2487	0.0050497	2.90	2.397
6,000	104.5925	0.0174321	3.391	2.891
7,000	138.7340	0.0198191	5.198	4.743
8,000	97.6138	0.0122017	5.700	5.579
9,000	89.87422	0.0099860	6.199	5.853

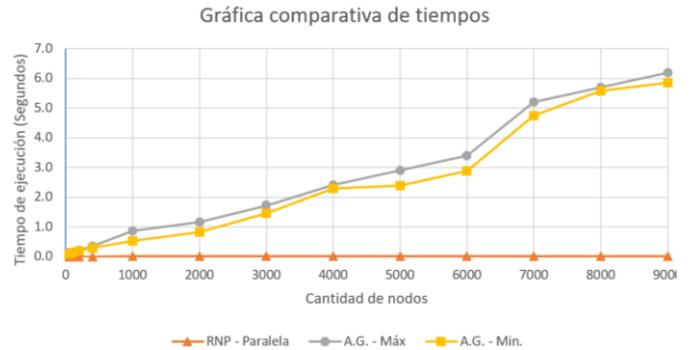


Fig. 7. Gráfica de tiempos de ejecución

Ambos algoritmos fueron ejecutados en un ordenador de 32GB de RAM @4300Mhz, Core i7 8700k @3.70Ghz, NVIDIA GTX 1080Ti, como sistema operativo Windows 10 de 64 bits.

Cabe destacar que, dentro de los resultados obtenidos mediante el Algoritmo Genético, es muy probable que cada ejecución nos retorne un resultado diferente, debido al uso de la característica de la aleatoriedad.

Una de las bondades de la red neuronal pulsante, así como en las demás redes neuronales, es el paralelismo.

Debido al modelado de las redes neuronales, el paralelismo se vuelve una característica muy atractiva, los tiempos de ejecución se pueden reducir considerablemente (Dependiendo del número de recursos disponibles).

Sin embargo, como es importante destacar, programar un algoritmo paralelo es un poco más complicado que de forma lineal. Además, existe poca tecnología paralela disponible en el mercado o que por lo menos no es tan accesible a todo público (En cuestión de costo). Eso implica que en muchas aplicaciones cotidianas no se pueda aprovechar la ventaja del paralelismo de la red neuronal.

### 3. Conclusiones y trabajo futuro

Se ha observado que, en cuestión de obtener un camino óptimo, la RNP es la ganadora sobre el Algoritmo Genético y a su vez a los algoritmos clásicos de *pathfinding*, ya que su complejidad es lineal y no exponencial, el cual sería el peor de los casos.

El Algoritmo Genético, también ha realizado un buen desempeño al encontrar la ruta, sólo que una de las desventajas sería que no obtiene el camino óptimo, si no uno cercano a éste. Y debido a su aleatoriedad, en algunos casos el camino de solución que nos genere será diferente a las ejecuciones anteriores.

Como trabajo futuro podría ser implementar la red neuronal de forma paralela, como primera instancia sería interesante utilizar la arquitectura unificada de dispositivos de cómputo (CUDA). Otra opción de trabajo futuro sería obtener el cálculo computacional que requieren los dos algoritmos utilizados en este artículo.

#### 4. Referencias

- [1] Thulasiraman, K., Arumugan, S., et al. Handbook of graph theory, CRC Press (2016).
- [2] Vanden-Eijnden, Eric. "Transition-path theory and path-finding algorithms for the study of rare events." Annual review of physical chemistry 61 (2010)
- [3] Daniel, G. Principles of artificial neural networks, World Scientific. (2013).
- [4] Ryan Leigh, Sushil J. Louis, Chris Miles, Using a Genetic Algorithm to Explore A\*-like Pathfinding Algorithms (2007)
- [5] H.S. Ranganath and G. Kuntimad, Pulse Coupled Neural Networks for Image Processing (1995)
- [6] Selvanathan, N., and Wee Jing Tee. "A genetic algorithm solution to solve the shortest path problem in OSPF and MPLS." Malaysian Journal of Computer Science 16.1 (2003)
- [7] Davis, Lawrence. "Handbook of genetic algorithms." (1991).
- [8] Lindblad, T., Kinsler, J. Image processing using pulse-coupled neural networks, Springer (1998).
- [9] Valentín Vázquez Castillo, Derlis Hernández Lara, et al. Implementación de algoritmos genéticos para el diseño, optimización y selección de vigas. (2017).
- [10] Hugo Lucas-Alvarado, Eddy Sánchez-De la Cruz, R. R. Biswal. Transport Routes Optimization in Martínez de la Torre, Veracruz City, Using Dijkstra's Algorithm with an Additional Parameter. (2017).
- [11] Brinkhoff, <https://www.cs.utah.edu/~lifeifei/SpatialDataset.htm> , consultado en Abril 2019
- [12] Wee Jing E., A genetic algorithm solution to solve the shortest path problem in OSPF and MPLS (2003).
- [13] Leigh, Ryan, Sushil J. Louis, and Chris Miles. "Using a genetic algorithm to explore A\*-like pathfinding algorithms." 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games. IEEE (2007).

#### 5. Biografías

**Edgar Rodríguez Cumplido.** Es Ingeniero en Informática egresado de la Universidad Politécnica del Estado de Morelos. Estudiante en curso de la Maestría en Ciencias de la Computación en el área de Inteligencia Artificial en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

**Dr. Manuel Mejía-Lavalle.** Es Doctor en Ciencias Computacionales por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y profesor - investigador en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Perteneció al IEEE habiendo sido presidente del Capítulo de Computación de la Sección Morelos, México en el período 2011-2012. Cuenta con Perfil Deseable PRODEP. Ha pertenecido también al Sistema Nacional de Investigadores, al Sistema Estatal de Investigadores (Morelos), a la Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial, y a la Academia Nacional de Investigación en Ciencias Computacionales. Investiga principalmente en las áreas de Inteligencia Artificial y de Redes Neuronales Artificiales.

**Dr. Gerardo Reyes Salgado.** Dr. en Ciencias Cognitivas por el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (Francia). Maestro en Ciencias Computacionales por el CENIDET (México). Ha sido profesor dentro y fuera de México en instituciones de educación media superior, superior y posgrados. Miembro del SNI, nivel I. Algunas de las distinciones recibidas son: Reconocimiento al Mérito Académico de la Región V, otorgado por la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería (ANFEI) en 2013; Miembro honorario del Sistema Estatal de Investigadores en Morelos por los años 2009 al 2017; Colaborador honorario de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) de Madrid, España y Miembro del Programa "Distinguished Visitors Program Latin America (DVP)" del IEEE Computer Society (2007-2009 y 2011-2013).

**Dr. Dante Mújica Vargas.** El profesor Dante Mújica Vargas obtuvo los grados de Dr. en Comunicaciones y Electrónica, Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica (con especialidad en Señales y Sistemas) e Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica (con especialidad en Control) en el Instituto Politécnico Nacional. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) nivel I desde el año 2015. Es un evaluador acreditado del CONACYT con registro RCEA-07-30530-2015, así como revisor activo en las revistas: Artificial Intelligence in Medicine (Elsevier), Journal of Visual Communication and Image Representation (Elsevier), Journal of Intelligent & Fuzzy Systems (IOS Press), Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization (Taylor&Francis), Evolving Systems (Springer), IEEE Access (IEEE), Transactions on Neural Networks and Learning Systems (IEEE), Neurocomputing (Elsevier). Ha publicado más de 15 artículos en revistas indexadas en el JCR. Sus líneas de investigación abarcan Procesamiento Digital de Imágenes (Médicas), Procesamiento Digital de Señales, Lógica Difusa, Sistemas Difusos y Algoritmos de Agrupamiento Difuso, Redes Neuronales con Aprendizaje Profundo, Reconocimiento de Patrones, Implementación de Algoritmos (paralelizados) en Procesadores Digitales Especializados (GPUs, DSPs y FPGAs) y Robótica Móvil Probabilista.

# Sistema de control on/off con retroalimentación de temperatura para aplicaciones optoelectrónicas.

J. A. Gómez-de Paz<sup>1,a</sup>, R. Grajales-Coutiño<sup>1,b</sup>, J. L. Camas-Anzueto<sup>1,c</sup>, S. Velázquez-Trujillo<sup>1,d</sup>,  
H. R. Hernández-de León<sup>1,e</sup>, J. Gómez-Pérez<sup>1,f</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

<sup>a</sup> isc\_agomez86@hotmail.com, <sup>b</sup> rgrajales@ittg.edu.mx, <sup>c</sup> jcamas@ittg.edu.mx, <sup>d</sup> sabinovelazquez1@gmail.com,  
<sup>e</sup> hhernandezd@ittg.edu.mx, <sup>f</sup> jgomezp@ittg.edu.mx

**Resumen**—Se presenta el desarrollo de un sistema de control tipo todo o nada (on/off) con retroalimentación de una variable (lazo cerrado), para controlar la temperatura y se utiliza en el desarrollo de aplicaciones optoelectrónicas. El objetivo del control sobre la temperatura es obtener mediciones a diferentes grados centígrados. El sistema desarrollado grafica y muestra los datos en tiempo real, y los guarda para su análisis en un software especializado de datos. Se utilizó la tarjeta de desarrollo Raspberry PI 3b+, resistencia eléctrica, celda termoelectrónica, y una caja térmica de 15 cm<sup>3</sup> en la que se controla la temperatura del aire. El sistema controla la temperatura en un rango de 20 °C a 70 °C. Es la primera fase para la investigación de un sensor de temperatura de fibra óptica.

**Palabras clave.** Optoelectrónica, control on/off, lazo cerrado.

## 1. Introducción

El objetivo de un sistema de control es regular o estabilizar el valor de la variable de salida hasta un setpoint indicado. En este sistema de control desarrollado la variable de salida a manipular es la temperatura. De acuerdo al funcionamiento de un sistema de control, se clasifica como lazo abierto o lazo cerrado. Un sistema de control de lazo abierto es en el que la acción de control es independiente de la salida y el de lazo cerrado, mejor conocido como retroalimentado, es aquel donde la acción de control depende de la salida. Un sistema on/off es donde el elemento final de control solo toma dos valores: encendido o apagado, a diferencia de cualquier otro tipo de control cuya acción es proporcional con respecto al error [1].

En el ámbito de fibras ópticas se utilizan láseres para desarrollar diversas aplicaciones como interferometría [2], amplificadores [3], multiplexación por división de onda [4] y sensores para medir diversas propiedades físicas como caudal, humedad, corriente, presión y temperatura entre otras aplicaciones [5].

Para desarrollar sensores de fibras ópticas para la detección de temperatura, es necesario realizar un control de esta durante las mediciones de un experimento, controlando la temperatura a diversos grados centígrados. El presente sistema de control on/off de lazo cerrado permite manipular temperaturas altas y bajas (20 °C a 70 °C), mediante un set point establecido (ingresado por el usuario).

## 2. Parte técnica del artículo

En la Fig. 1 se observa que para el desarrollo de sensores de fibra óptica se consideran 5 fases: implementación de un sistema de control de temperatura, realización de un arreglo

experimental con componentes y dispositivos ópticos, tomar mediciones en experimentos de arreglos experimentales manipulando la temperatura, realizar el modelado matemático de los datos obtenidos durante las mediciones (potencia de entrada, temperatura y potencia de salida), y por ultimo al quitar el control de temperatura (de acuerdo al comportamiento del modelo de la fase anterior) se logra determinar la temperatura (Ver Fig. 2).

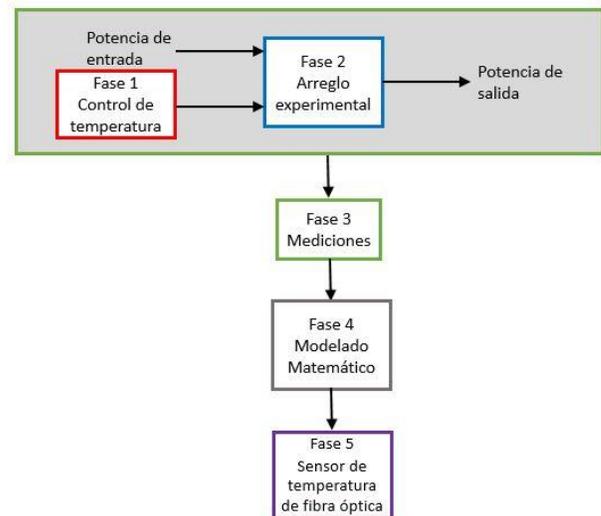


Fig. 1. Fases para el desarrollo de un sensor de temperatura

### A. Diagrama y componentes del sistema de control de temperatura

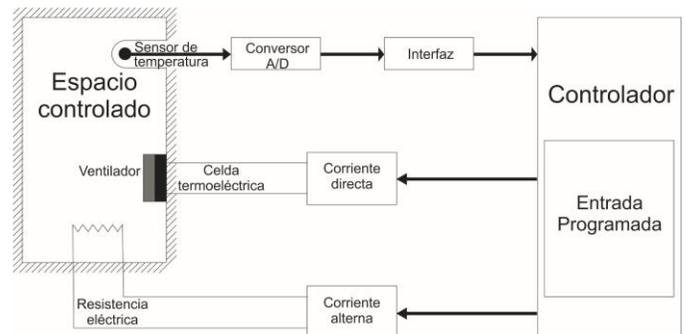


Fig. 2. Diagrama a bloques del funcionamiento del sistema de control de temperatura

En la Fig. 3 se muestra como está elaborada la caja térmica en la que se controla la temperatura del aire interior, está elaborada de cristal y mide 15 cm<sup>3</sup>, tiene soportes de aluminio en las esquinas e internamente en cada costado tiene una capa de poliestireno de 2 cm.



Fig. 3. Caja térmica

El poliestireno tiene como característica principal su baja conductividad térmica, es considerado como un buen aislante térmico, es decir, se opone al flujo del calor; para demostrar esto, basándose en la termodinámica, si un cuerpo posee una temperatura diferente a otro con el que está en contacto o la temperatura del ambiente, ocurre una transferencia de calor para equilibrar ambas temperaturas, a este proceso se le conoce como equilibrio térmico. El cuerpo que tiene la temperatura más alta transfiere energía térmica al cuerpo con temperatura más baja; Sin embargo, una de las desventajas del poliestireno, es que cuenta con una baja resistencia al calor, comenzando a deformarse a los 85 °C [6], teniendo esto como limitante, el sistema desarrollado permite controlar la temperatura por debajo de la ya mencionada.

La caja térmica a un costado tiene un orificio en forma de círculo con diámetro de 4 cm, para colocar un sistema de refrigeración termoeléctrico, y en la parte posterior 3 orificios de 5 mm de radio para introducir una resistencia eléctrica y un sensor resistivo de temperatura pt100, que es un sensor basado en la variación de resistencia de un conductor con la temperatura, todos los componentes ya mencionados se controlan mediante on/off.

El sistema de control se implementó utilizando una tarjeta Raspberry pi 3 b+ con sistema operativo Raspbian, y el lenguaje de programación en el que se desarrollo es Python V2, utilizando así los pines GPIO para el control de dispositivos y lectura de sensores [7].

Python es un lenguaje de programación de propósito general, fácil de usar y aprender, libre, orientado a objetos y portable [8].

Para controlar la temperatura se utilizan una resistencia eléctrica y un sistema de enfriamiento termoeléctrico, se alimentan de 120 Voltios (V) y 12 V respectivamente.

La resistencia eléctrica que se utilizo es un termistor PTC (Positive Temperature Coefficient), incrementa su resistencia a medida que la temperatura aumenta y es comúnmente utilizada para calentar el aire o sólidos, está elaborada con cerámica y cubierta con una capa de aluminio para facilitar la disipación del calor (ver Fig. 4).



Fig. 4. Resistencia eléctrica

Los enfriadores termoeléctricos, también conocidos como celdas peltier, son dispositivos que generan temperaturas diferentes en sus dos caras al circular una corriente: una de sus caras se enfría, mientras que la otra se calienta. Son ampliamente utilizados para enfriar por debajo de la temperatura del ambiente, tomando en cuenta que se debe disipar la cara caliente. Al invertir su polaridad, la cara fría pasa a ser caliente y viceversa. Para funcionar eficientemente, se necesita extraer el calor de la cara caliente: se utiliza un disipador de aluminio con un ventilador. Si no se utilizan estos medios el lado frio no enfriara correctamente, la celda se sobrecalienta y se daña, también, se deben de colocar en la otra cara (ver Fig. 5).



Fig. 5. Sistema de refrigeración termoeléctrico

### B. Funcionalidad del software

El código fuente se desarrolló en el lenguaje de programación Python V2, con un total de 458 líneas y para programar interfaces graficas se utilizó la librería “tkinter”. Se

implementó un algoritmo de control on/off para decidir el momento de apagado o encendido de la celda peltier o la resistencia eléctrica.

Al ejecutar el código fuente muestra la pantalla principal donde se aprecia la temperatura ambiente en una etiqueta y dos botones para enfriar o calentar el aire. Al dar clic en cualquier botón, abrirá una nueva ventana solicitando un valor numérico, entre 20 y 70, asumiendo un valor flotante o no --decimal o entero--; el valor ingresado es el “set point”, identificado como el valor que mantiene la temperatura mediante un control tipo on/off. Para realizar este proceso, es de suma importancia, tener presente la temperatura ambiente (ver Fig. 6).



Fig. 6. Pantalla principal del sistema

Una vez ingresado el set point, el sistema mantendrá dicha temperatura, encendiendo o apagando la resistencia eléctrica o la celda peltier, en función de la opción elegida (para este caso calentar): si la temperatura es superior al set point se desactiva la salida y si es inferior se activa, es comportamiento de tipo on/off y se distingue en la Fig. 7, donde se observa la señal controlada y la señal que alimenta los dispositivos, respectivamente. Si el set point ingresado es 50 °C y la temperatura ambiente es 26 °C, se activa la resistencia eléctrica hasta llegar al valor deseado, una vez superado el valor se apaga la resistencia para comenzar a disminuir la temperatura, cuando baja del valor, se activa nuevamente para volver a calentar, continuando este comportamiento durante el tiempo a controlar; para enfriar, el proceso es contrario, utilizando solamente la celda peltier.

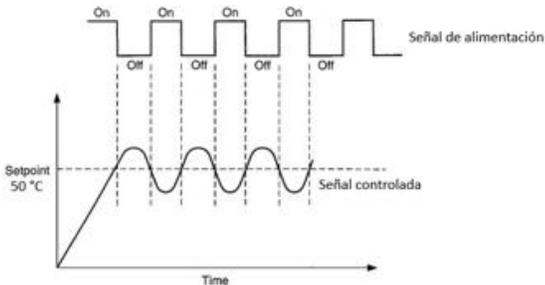


Fig. 7. Comportamiento del control on/off de la resistencia eléctrica

El sistema muestra y grafica en tiempo real los datos, hora y temperatura (Fig. 8), y los almacena en un archivo con extensión xls para su posterior uso y análisis; debido a que un dispositivo medidor de potencia óptica almacena la hora y la potencia en un archivo con extensión txt, al realizar mediciones en un arreglo experimental se logra relacionar la potencia y la temperatura con respecto al tiempo, obteniéndose las gráficas correspondientes. Se observa que la temperatura está disminuyendo de 27.8 °C hasta 21 °C y la estabilización de la temperatura a 60 °C mediante control on/off, partiendo de 26 °C

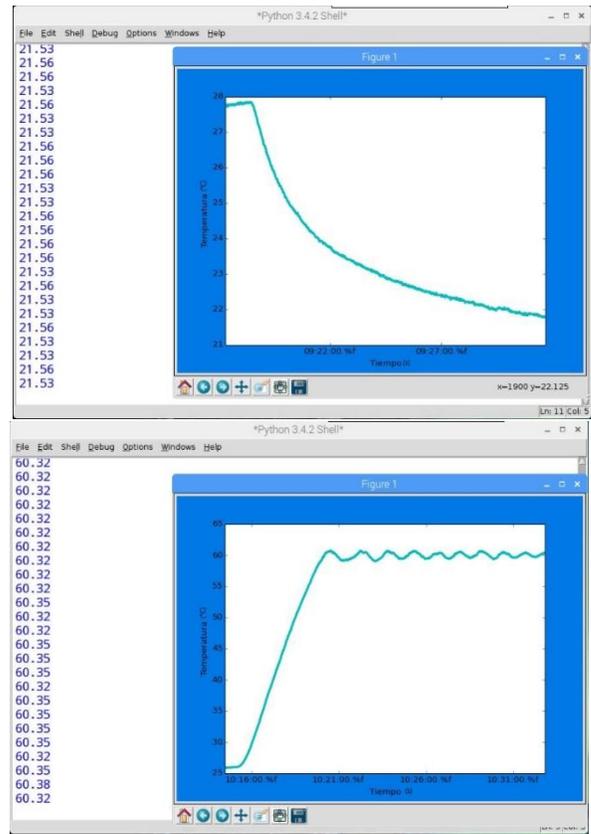


Fig. 8. Datos en tiempo real

Haciendo uso del software especializado en análisis y gráficos de datos, llamado Origin en su versión 8, se graficaron los datos almacenados en dos muestras diferentes, como resultado se observa en la Fig. 9 el control on/off de la resistencia eléctrica a 60 °C partiendo de 25.9 °C y el control on/off de la celda peltier a 22 °C partiendo de 26.7 °C (Fig 9).

Las gráficas obtenidas son utilizadas a futuro para aplicaciones ópticas al monitorear la potencia de un arreglo experimental con respecto a la temperatura, que permite la continuación de la metodología propuesta identificada en la Fig. 1.

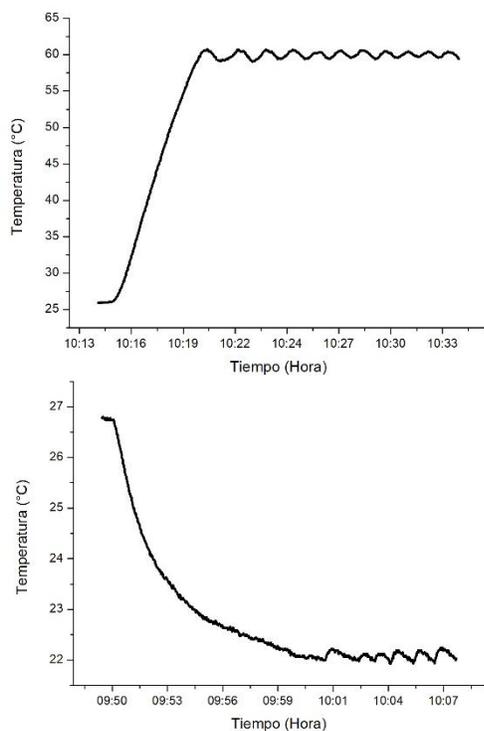


Fig. 9. Gráficas de estabilización a 60 °C y 22 °C generadas en Origin

### 3. Conclusiones

De los resultados obtenidos en la puesta a prueba del sistema de control de temperatura se encontró que las celdas peltier son dispositivos que presentan una buena respuesta de enfriamiento en espacios reducidos, si el sistema de aislante térmico es el poliestireno a concentraciones estándar, implementándose con los cuidados que propone el fabricante al utilizarlo. Se observó que la resistencia eléctrica permite elevar temperaturas superiores a la del ambiente.

Como resultado el rango de manipulación de la temperatura es de 20 a 70 °C con un margen de error que permite la programación realizada en Python de  $\pm 0.4$  °C para enfriar y  $\pm 0.8$  °C para calentar.

Este dispositivo tiene un buen desempeño para experimentos que requieran un control de temperatura, como en aplicaciones ópticas o bioquímicas.

El presente trabajo es la primera fase de cinco, para el desarrollo de un proyecto de investigación de un sensor de temperatura de fibra óptica. Se ha aplicado en otras áreas, como bioquímica, con las adecuaciones correspondientes.

### 4. Referencias

[1] R. H. Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con Matlab*. Pearson Educación, 2010.

[2] M. I. Irshid and M. Kavehrad, "A full transparent fiber-optic ring architecture for WDM networks," *J. Light. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 101–108, 1992.

[3] J. P. Koplow, D. A. V. Kliner, and L. Goldberg, "Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 7, pp. 442–444, 2000.

[4] J. Blake, P. Tantaswadi, and R. T. de Carvalho, "In-line Sagnac interferometer current sensor," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 1, pp. 116–121, 1996.

[5] J. M. Lopez-Higuera, L. Rodriguez Cobo, A. Quintela Incera, and A. Cobo, "Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring," *J. Light. Technol.*, vol. 29, no. 4, pp. 587–608, Feb. 2011.

[6] C. Sólis, "PROPIEDADES DEL EPS KNAUF Therm Th35SE," España, Dossier de calidad, 2005.

[7] R. Grimmer, *Raspberry Pi Robotic Projects - Third Edition*. Packt Publishing, 2016.

[8] M. Lutz, *Learning Python: Powerful Object-Oriented Programming*. O'Reilly Media, 2013.

### 5. Biografías

José Amado Gómez de Paz obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2009 y actualmente es estudiante de Maestría en Ciencias en Ing. Mecatrónica (MCIM).

Rubén Grajales Coutiño obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2002. Es maestro en ciencias y doctor en óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) en 2004 y 2008 respectivamente. En 2008 realizó una estancia posdoctoral en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO). Actualmente es profesor-investigador del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Jorge Luis Camas Anzueto obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y Electrónica. Obtuvo su grado de doctor en Ciencias con Especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y electrónica. Ha publicado diversos artículos Nacionales e Internacionales, presentado Conferencias y dirigido varias Tesis de Licenciatura y de Maestría. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, Miembro Estatal de Investigadores Miembro Honorífico, Perfil deseable ante PRODEP desde 2010 a la fecha. Ha escrito 34 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en JCR, escrito 12 artículos en revistas de otros índices, más de 50 memorias de congreso nacional e internacional.

Sabino Velázquez Trujillo es Ingeniero Industrial en Producción por el Instituto Tecnológico de Tuxtla, México. Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial (1995) por el Instituto Tecnológico de Orizaba, México. Doctor en Ciencias en Ingeniería en el área de Procesos de Manufactura (2009) por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, Querétaro, Quer., México. Actualmente es investigador a tiempo completo y profesor de los programas de posgrado en el Instituto tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas

Héctor Ricardo Hernández de León es Profesor Investigador del Departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG). Realizó estudios de Maestría y Doctorado en Ciencias en Sistemas Automáticos en el Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas (INSA), en la ciudad de Toulouse, Francia. Actualmente es Profesor Investigador de la Licenciatura en Ing. Electrónica, Maestría en Ciencias en Ing. Mecatrónica (MCIM) y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DCI).

Joel Gómez Pérez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2005 y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013 y profesor con perfil Deseable (PRODEP) desde 2017. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2011.

# Algoritmo híbrido basado en Colonia de Abejas Artificiales para el ajuste de un sistema difuso para la selección de rutas

R. Carrillo<sup>1,a</sup>, E. Escobar<sup>1-2,b</sup>, S. Velázquez<sup>1-2,c</sup>, M. Pérez<sup>1,d</sup>, H. Hernández<sup>1,e</sup>, R. Olivera<sup>1-2,f</sup>, C. de Coss<sup>2,g</sup>, C. Pascacio<sup>2,h</sup>, C. Gómez<sup>2,i</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Departamento de Posgrado, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> rene.carrillo@ittuxtlagutierrez.edu.mx, <sup>b</sup> enescobarg@ieee.org, <sup>c</sup> sabinovelazquez1@hotmail.com, <sup>d</sup> mperez@ittg.edu.mx,

<sup>e</sup> hhernandezd@ittg.edu.mx, <sup>f</sup> re.olivera94@gmail.com, <sup>g</sup> cdecoss@ittg.edu.mx, <sup>h</sup> pascacio291010@hotmail.com, <sup>i</sup> hazda\_@hotmail.com

**Resumen**— En este artículo se presenta la propuesta de un algoritmo híbrido utilizado en la selección de rutas para la distribución de productos. Este algoritmo propuesto integra la determinación de tiempos estimados de recorrido más confiables, un algoritmo de Colonia de Abejas Artificiales (ABC) y un Modelo Difuso basado en reglas (MD). El MD está constituido por dos variables difusas de entrada, Tráfico y Horario, y una variable difusa de salida, Ajuste del Tiempo. El algoritmo ABC permite que el MD sea adaptativo, al obtener un nuevo valor de la variable difusa Tráfico, logrando que los tiempos estimados sean más aproximados a los tiempos reales de recorrido. Con los nuevos tiempos estimados se determina la ruta más corta; los resultados del algoritmo permiten reducir el porcentaje de error absoluto del tiempo estimado inicial de 7.38% al error absoluto del nuevo tiempo estimado de 0.05%, alcanzando el objetivo del proyecto.

*Palabras clave.* Algoritmo de abejas artificiales, lógica difusa, ABC híbrido, optimización, ruta más corta.

## 1. Introducción

Actualmente los algoritmos meta-heurísticos son usados para resolver diferentes problemas de optimización. Este trabajo está basado particularmente en la integración del algoritmo ABC: Colonia de Abejas Artificiales y un Modelo Difuso.

Encontrar la ruta más corta en un conjunto de N nodos es un problema a resolver, entre más nodos, requiere un hardware de mayor capacidad.

En el estado del arte existen propuestas que están relacionadas con los problemas de logística, para la selección de rutas o ruta más corta con incertidumbre [3], [4], [5], [6], [8], [9] y [10], permitiendo un área de oportunidad en los sistemas que no se elijan correctamente la ruta, por la información incierta contemplada hasta hacerlos adaptativos; permitiendo periódicamente que las variables de entrada del sistema se adapten a las nuevas condiciones en los factores relacionados con la incertidumbre, para determinar la mejor ruta a elegir.

Para el ajustar los parámetros de un controlador difuso usan diversas propuestas, como: enfoque de aprendizaje híbrido basado en el filtro de Kalman extendido desacoplado y descenso de gradiente [7]; observadores adaptativos [15]; algoritmos de búsqueda de organismos simbióticos [16]; enfoque para diseñar el sistema de decisión de traspaso

incorporando el autoajuste [17]; algoritmos genéticos [18]; entre otros.

El trabajo expuesto es una propuesta basada en dos elementos principales: modelo difuso y algoritmo ABC, que permite el ajuste de la variable de entrada del modelo difuso. El algoritmo ABC se aplica generalmente en diversos temas, como: algoritmo multiobjetivo [1] y problemas de orientación [2], entre otros.

En un grafo (ver Fig. 1) se identifica la calle que es el arco que permite la conexión con dos nodos; en el mapa de una ciudad se considera cada cruce vial como un nodo y el transitar por la misma representa el traslado de un nodo a otro; dentro de estas; los tiempos de recorrido son determinados por la longitud de la calle y a la velocidad permitida por el reglamento de tránsito [14].



Fig. 1. Zona delimitada para las pruebas

Se considera que el tiempo de recorrido en cada calle es incierto, debido al cambio en función de las variables identificadas: Tráfico y Horario; el tiempo de recorrido de una calle depende de la zona localizada y la hora de realizar el recorrido. Permitiendo plantear un modelo difuso que considera las variables del entorno: Tráfico y Horario, para determinar el ajuste del tiempo de recorrido; aplicando el algoritmo ABC se vuelve adaptativo el MD.

El problema de optimización, consiste en la reducción del error, del tiempo y etapas para lograr el objetivo; dada la necesidad de encontrar la ruta más corta, para las variables del entorno que favorecen en la actualización de los datos de manera constante, hasta lograr la cercanía a un valor real de la ruta generada.

## 2. Modelo propuesto

El modelo propuesto integra dos elementos importantes: el modelo difuso, que realiza un ajuste de los tiempos de recorrido de las calles en función de las variables Tráfico y Horario y el algoritmo ABC que lleva a cabo la adaptación periódica de la variable Tráfico para cada calle. Midiendo el tiempo real de tránsito de la calle seleccionada, se compara con el tiempo de recorrido estimado por el modelo. Integrado en tres fases.

### ETAPA A. Algoritmo de Abejas Artificiales

El algoritmo ABC está diseñado para simular el comportamiento de búsqueda de alimento de una colonia de abejas. Un enjambre de abejas típico consiste de tres componentes: fuentes de alimento, abejas empleadas y abejas desempleadas. Las abejas empleadas se les nombra como abejas obreras, y son las que llevan la información relacionada con la distancia, dirección y calidad de la fuente de alimento. Las abejas desempleadas son consideradas como las abejas observadoras y exploradoras. Las primeras tratan de encontrar una fuente de alimento por medio de la información proporcionada por la abeja obrera, mientras que la segunda busca aleatoriamente encontrar una nueva mejor fuente de alimento.

Una abeja obrera cuando la fuente de alimento se agota, se convierte en una exploradora y comienza a buscar una nueva fuente de alimento. Se asume que el número de abejas obreras en la colonia es igual el número de fuentes de alimentos. La posición de una fuente de alimento representa una posible solución al problema de optimización, mientras que la cantidad de una fuente de alimento corresponde a la calidad de la solución asociada. Inicialmente, el ABC genera una población aleatoriamente distribuida de soluciones de SN (Size Number) en el espacio de búsqueda; denotando el SN como el tamaño de abejas obreras [11].

La búsqueda/selección probabilística global y local se implementan en un ciclo ABC. Cada ciclo está compuesto por una serie de tareas realizadas por diferentes tipos de abejas, siendo esencialmente independientes [11].

Las operaciones de tipo exploración proporcionan una capacidad sobresaliente al método ABC para encontrar la mejor solución global, al realizar búsquedas estocásticas en todo el espacio tridimensional; identificando que las abejas exploradoras buscarán de forma independiente la solución óptima global; mientras que, obreras y observadoras están examinando simultáneamente sus soluciones locales posibles

para obtener el mejor valor global; la posibilidad de quedarse en óptimos locales no es aplicable al algoritmo ABC.

### Pseudocódigo Algoritmo ABC

El pseudocódigo implica 8 fases explicados a continuación:

1. Inicialización  
Inicializar las fuentes de alimentos y evaluar la cantidad de néctar (fitness) de las fuentes de alimentos;  
Enviar las abejas empleadas a la fuente de alimentos actual;  
Iteración = 0;
2. DO WHILE (las condiciones de terminación no se cumplen)
3. Fase de abejas empleadas  
FOR (cada abeja empleada)  
Encontrar una nueva fuente de alimento en su vecindario;  
Evaluar la aptitud (fitness) de la nueva fuente de alimentos, aplicar selección codiciosa;  
END FOR
4. Calcule la probabilidad P para cada fuente de alimento;
5. Fase de las abejas observadoras  
FOR (cada abeja observadora)  
Enviar abejas observadoras a las fuentes de alimentos dependiendo de P;  
Encontrar una nueva fuente de alimentos en su vecindario;  
Evaluar la aptitud de la nueva fuente de alimentos, aplicar una selección codiciosa;  
END FOR
6. Fase de las abejas exploradoras  
IF (cualquier abeja empleada se convierte en abeja exploradora)  
Enviar la abeja exploradora a una fuente de alimento producida al aleatoriamente;  
END IF
7. Memorice la mejor solución lograda hasta ahora.  
Iteración = Iteración + 1;  
END WHILE
8. Produzca la mejor solución lograda.

### ETAPA B. Modelo difuso

Las funciones de pertenencia del sistema difuso están dadas por las variables difusas de entrada Tráfico y Horario. Como se observa en la Fig. 2, la variable difusa de entrada Tráfico está formada por tres conjuntos difusos con funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, que representan el nivel de tráfico: ligero, medio y pesado.

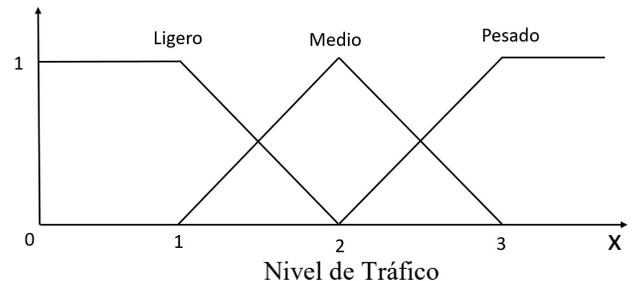


Fig. 2. Variable difusa de entrada Tráfico

En el desarrollo del proyecto se localizaron factores que influyen en el tráfico: la proximidad a zonas escolares, zonas comerciales y/o los accesos a empresas; el estado de las calles; zonas en mantenimiento; entre otros.

La Fig. 3 muestra la variable difusa de entrada denominada Horario, formada por 6 conjuntos difusos con funciones de pertenencia trapezoidales que representan el horario de madrugada; la entrada a la oficina y/o escuela; la mañana; la salida de la oficina y/o escuela; la tarde y la noche.

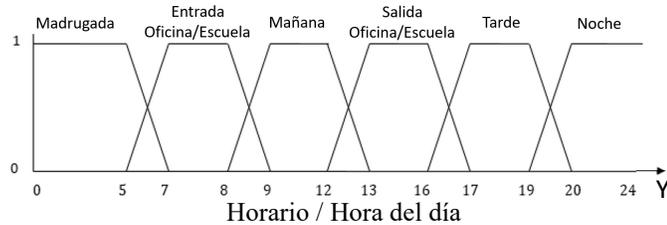


Fig. 3. Variable difusa de entrada Horario

En la Fig. 4 se presenta la variable difusa de salida Ajuste del tiempo, que está relacionada con la modificación en el tiempo de recorrido al transitar por una calle. Esta variable está formada por seis conjuntos difusos: Muy rápido; Rápido; Normal; Lento; Muy lento y Muy muy lento.

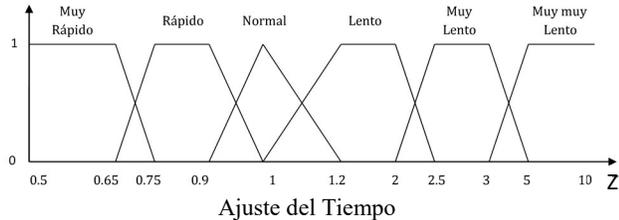


Fig. 4. Variable difusa de salida Ajuste del tiempo

Identificando el comportamiento del personal de reparto, se estableció la base de reglas difusas presentadas en la Tabla 1; el valor de la variable difusa de salida depende del grado de pertenencia a los conjuntos difusos de las variables de entrada: Horario y Tráfico.

TABLA 1. REGLAS DIFUSAS

Entradas		Salida
Horario	Zona de Tráfico	Ajuste del Tiempo
Madrugada	Ligero	Muy Rápido
	Medio	Muy Rápido
	Pesado	Muy Rápido
Entrada	Ligero	Normal
	Medio	Lento
	Pesado	Muy muy Lento
Mañana	Ligero	Normal
	Medio	Lento
	Pesado	Muy Lento
Salida	Ligero	Lento

Tarde	Medio	Muy Lento
	Pesado	Muy muy Lento
	Ligero	Rápido
Noche	Medio	Normal
	Pesado	Muy Lento
	Ligero	Muy Rápido
	Medio	Muy Rápido
	Pesado	Muy Rápido
	Ligero	Muy Rápido

Para realizar pruebas y probar el funcionamiento del algoritmo híbrido, se seleccionó la zona centro de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, mostrada en la Fig. 1.

Para el modelo difuso se realizó el mecanismo de inferencia en el que se requieren las entradas difusas y definir las reglas difusas, mencionadas anteriormente. Los valores difusos se obtienen evaluando a través de las funciones de pertenencia. Al presentar los resultados de la variable de salida, que se obtuvieron con el proceso de inferencia se interpretan por medio de defusificación, utilizando el método de centro geométrico.

### ETAPA C. Algoritmo híbrido ABC para el ajuste de parámetros de un sistema difuso

El objetivo principal del algoritmo propuesto es obtener un ajuste del tiempo de recorrido de las calles en la zona seleccionada (Fig. 1), de manera que los tiempos de recorrido estimados se aproximen a los tiempos de recorrido reales, que permitan determinar las rutas de distribución de manera precisa. Para lograr este resultado se aplica el algoritmo propuesto.

Inicialmente, el algoritmo propuesto nos permite determinar los nuevos valores de la variable difusa Tráfico para cada calle analizada, considerando como base un tiempo estimado de recorrido por calle (obtenido del algoritmo) y el tiempo real medido de recorrido en el horario establecido; posteriormente, se usan los datos calculados, aplicando el modelo difuso para obtener un nuevo ajuste de los tiempos de recorrido de las calles. Calculando los nuevos tiempos estimados, hasta obtener el error cuadrático entre el tiempo estimado y el tiempo real; repitiendo el ciclo hasta obtener un error permisible. La determinación de estos valores se realiza periódicamente, en función de los cambios de los factores (horario y tráfico) que influyen en los tiempos de recorrido.

El algoritmo cuenta con la siguiente secuencia.

1. Inicializamos
  - a. Inicializamos valores necesarios
2. Ciclo While (TR-TE)
  - a. Se ejecuta el ABC híbrido
    - i. Genera valores aleatorios

- ii. Cálculo de tiempo, función que se llama por aparte.
  - iii. Se obtiene el ajuste difuso mediante el MD.
- b. Hasta que el error sea mínimo.
  3. El valor del parámetro es el adecuado para cumplir con el Tiempo Real (TR).
  4. Obtenemos un nuevo Tiempo Estimado (TE) para esa calle (evaluado en el momento), con nuevos valores en las variables que almacena cada calle.
  5. Se almacenan los datos, en espera de volver a ser ajustados si así se requiere.

El desarrollo del algoritmo se realizó mediante el software MATLAB®. En el Fig.5 se indican los bloques que contempla el programa principal, incluyendo el uso del ABC híbrido.

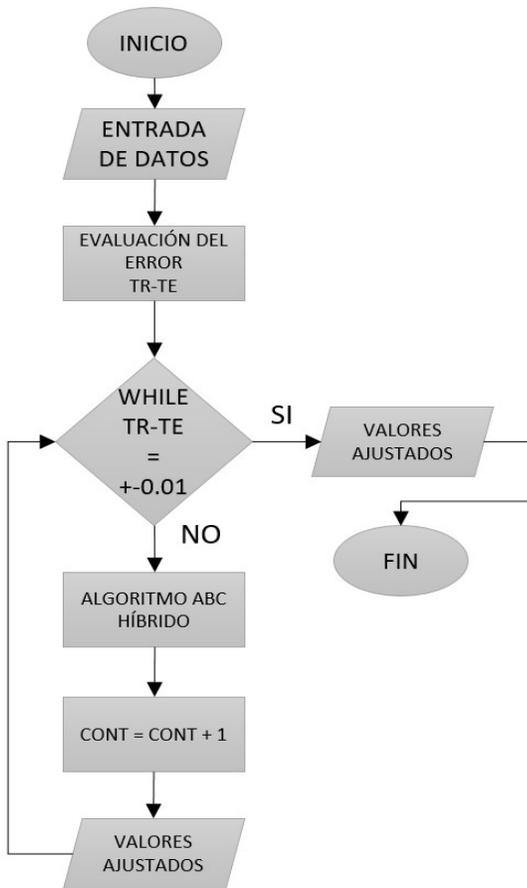


Figura 5. Diagrama de flujo

**Pseudocódigo algoritmo ABC híbrido**

El pseudocódigo implica 8 fases explicados a continuación:  
 1. Inicialización  
 Inicializar las fuentes de alimentos y evaluar la cantidad de néctar de las fuentes de alimentos;  
 Enviar las abejas empleadas a la fuente de alimentos actual;

- Se obtiene la posición de la abeja asignando este valor para interpretarlo en el modelo difuso, regresando este un valor para volver interpretar por el ABC.  
 Obtenemos el costo del valor antes establecido para determinar un valor de inicio al error para comparar respecto a los valores que se obtengan para obtener el resultado esperado.
- Iteración = 0;  
 2. FOR (Se declara un número máximo de iteraciones para realizar el proceso)  
 3. Fase de abejas empleadas  
 FOR (cada abeja empleada)  
 Encontrar una nueva fuente de alimento en su vecindario;  
 Evaluar la aptitud de la nueva fuente de alimentos, si esta solución es mejor, se guarda como mejor fuente de alimentos y la abeja obtiene esa posición hasta encontrar una mejor;  
 END FOR  
 4. Calcule la probabilidad P para cada fuente de alimento;  
 5. Fase de las abejas observadoras  
 FOR (cada abeja observadora)  
 Enviar abejas observadoras a las fuentes de alimentos dependiendo de P (probabilidad);  
 Encontrar una nueva fuente de alimentos en su vecindario;  
 Evaluar la aptitud de la nueva fuente de alimentos, si esta solución es mejor, se guarda como mejor fuente de alimentos y la abeja obtiene esa posición hasta encontrar una mejor;  
 END FOR  
 6. Fase de las abejas exploradoras  
 FOR (Cada abeja exploradora)  
 IF (cualquier abeja empleada se convierte en abeja exploradora)  
 Enviar la abeja exploradora a una fuente de alimento producida al aleatoriamente;  
 END IF  
 END FOR  
 7. Memorice la mejor solución lograda hasta ahora.  
 Iteración = Iteración + 1;  
 END FOR  
 8. Produzca la mejor solución lograda.

**3. Resultados**

Los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo híbrido propuesto, permiten que el tiempo estimado (TE) al transitar por una calle sea el más próximo al tiempo real de recorrido (TR). En la Tabla 2 se presentan valores obtenidos en la aplicación del algoritmo híbrido en la calle del nodo 1 al 15 (extremo izquierdo superior de la Fig. 4 señalado), a las 7:50 horas.

**TABLA 2. RESULTADOS DEL AJUSTE EN UNA CALLE EN UN HORARIO DE 7:50 HRS.**

Calle	Tráfico	TE	TR	Nuevo. Tráfico	Nuevo. TE	Iteración. ABC	Error
1,15	2.29	67.33	44.65	2.04	44.7435	5	0.0087422
1,15	2.29	67.33	44.65	2.0397	44.6423	6	0.0000592

En la Tabla 2 se muestran valores: la calle seleccionada, ver Fig. 4; el valor inicial de la variable difusa: Tráfico, dada en función de la ubicación de la calle (1,15); el tiempo de recorrido estimado (columna 3) calculado previamente con el algoritmo híbrido; el tiempo de recorrido real (columna 4), obtenido por una medición; el nuevo valor de la variable Tráfico (columna 5), determinado con el algoritmo híbrido; el nuevo tiempo de recorrido estimado (columna 6), obtenido por el algoritmo híbrido; el número de iteración en el algoritmo (columna 7); y el error cuadrático calculado (columna 8).

En la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos al aplicar el algoritmo a una ruta definida del nodo 15 al nodo 57 de la Fig. 4, representa una empresa de reparto, ubicada en 1ª Norte y 5ª Poniente, a la dirección de un cliente en 2ª Sur y 2ª Poniente de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. En esta tabla se observan las calles asignadas para la ruta (columna 1), el horario (columna 2), el valor inicial de la variable difusa Tráfico (columna 3), el tiempo de recorrido de la calle (columna 4), el TE (columna 5), el TR (columna 6), el nuevo valor de la variable difusa Tráfico (columna 7) y el nuevo TE (columna 8).

**TABLA 3. RUTA COMPLETA CON AJUSTES**

Calle	Hora	Tráfico	Tiempo Calle	Tiempo Estimado (seg)	Tiempo Real (seg)	Nuevo Trafico	Tiempo Estimado (seg)
15,16	07:50:00	2.1	15	44.66	50	2.0591	49.9945
16,17		2.19	15	57.56	55	2.0804	55.0077
17,30		1.9	17	34.58	33	1.4721	32.995
30,43		2.39	16	124.7	122	2.19	122.0029
43,56		2.1	15	49.56	51	2.0633	51.0483
56,69		2.1	16	52.46	55	2.0664	54.9385
69,70		2.2	15	58.45	53	2.0716	53.0339
70,57		2.29	16	71.41	60	2.0874	59.9229

En la Tabla 4 se concentran los tiempos de recorrido estimados inicialmente (columna 2), los tiempos de recorrido real (columna 3) y los nuevos tiempos de recorrido estimados de la ruta establecida (columna 4).

Para el análisis estadístico utilizamos la prueba t pareada con  $\alpha = 5\%$ , y proponemos la hipótesis nula ( $H_0$ ) y la hipótesis alternativa ( $H_1$ ) mostradas en la ecuación (1).

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_{TEI} - \mu_{NTE} &= 0 \\
 H_1: \mu_{TEI} - \mu_{NTE} &> 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

**TABLA 4. DATOS CONCENTRADOS PARA COMPARAR LOS TIEMPOS AJUSTADOS**

Ruta inicial (15-57) 07:50:00	Tiempo Estimado Original	Tiempo Real	Tiempo Estimado Nuevo
15,16	44.65620088	50	49.9945
16,17	57.55733877	55	55.0077
17,30	34.5830455	33	32.995
30,43	124.6690757	122	122.0029
43,56	49.56021523	51	51.0483
56,69	52.46422957	55	54.9385
69,70	58.45702479	53	53.0339
70,57	71.41504119	60	59.9229
	0:08:13	07:59	

Donde,  $\mu_{TEI}$  = Error porcentual medio del tiempo estimado inicial;  $\mu_{NTE}$  = Error porcentual medio del nuevo tiempo estimado.

En la prueba T pareada se obtiene el valor de p (0.00395), siendo este menor que el nivel de significancia (0.05), y el estadístico calculado (3.67442) es mayor que el valor crítico de t (1.89457), por lo que la hipótesis nula es rechazada. Concluyendo que los nuevos tiempos estimados predicen mejor, los tiempos de recorrido reales.

#### 4. Conclusiones

El uso de variables difusas para la determinación de las rutas de reparto es importante para aplicaciones prácticas. Sin embargo, aplicar algoritmos meta-heurísticos, como el ABC, para hacer adaptativo el modelo difuso potencializa los resultados, como los obtenidos en la presente propuesta.

En la exposición de este artículo, se obtuvo un buen desempeño con el algoritmo propuesto, integrando el modelo difuso junto con el algoritmo ABC, en la selección de rutas. Logrando que los valores sean dinámicos y adaptados a las condiciones del entorno de manera eficiente y con un error pequeño.

La propuesta provee una buena herramienta para la selección de rutas dentro de una ciudad, incrementando su confiabilidad al reducir considerablemente el error del tiempo, estimado de recorrido respecto al tiempo real de recorrido. Con los resultados obtenidos se garantiza que los tiempos utilizados para definir las rutas de reparto son prácticamente los mismos que los tiempos de recorrido reales en las condiciones observadas, permitiendo la confirmación de la funcionalidad del Algoritmo híbrido ABC para el ajuste de parámetros de un sistema difuso.

#### 5. Referencias

- [1] Y. Jarraya, S. Bouaziz, A.M. Alimi, "Hierarchical Flexible Beta Fuzzy Design by a Multi-Objective Evolutionary Hybrid Approach", IEEE Access, 6, pp. 11544-11558, 2018.
- [2] R. Martín, M. Vega, "Algoritmo Multiobjetivo de Colonia de Abejas Artificiales aplicado al Problema de Orientación", XIII Congreso

- Español en Meta-heurísticas y Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados, pp. 657-662, 2018.
- [3] Deng, Y., Chen, Y., Zhang, Y. and Mahadevan, S., "Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment", *Applied Soft Computing*, 12(3), pp.1231-1237, 2012.
  - [4] Fatemidokht, H. & Rafsanjani, M.K., "F-Ant: an effective routing protocol for ant colony optimization based on fuzzy logic in vehicular ad hoc networks", *Neural Comput & Applications*, 2016.
  - [5] C. Bode & S. Imich, "The shortest-path problem with resource constraints with -loop elimination and its application to the capacitated arc-routing problem", *European Journal of Operational Research*, 238(2), pp. 415-426, 2014.
  - [6] An, P., Hai, N. and Hoai, T., "Direct multiple shooting method for solving approximate shortest path problems", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 244, pp.67-76, 2013.
  - [7] I. Eyoh, R. John, G. De Maere and E. Kayacan, "Hybrid Learning for Interval Type-2 Intuitionistic Fuzzy Logic Systems as Applied to Identification and Prediction Problems", *Transactions on Fuzzy Systems*, 2018.
  - [8] D. Duque, L. Lozano and A. Medaglia, "An exact method for the biobjective shortest path problem for large-scale road networks", *European Journal of Operational Research*, 242(3), pp.788-797, 2014.
  - [9] R. Hassanzadeh, I. Mahdavi, N. Mahdavi-Amiri and A. Tajdin, "A genetic algorithm for solving fuzzy shortest path problems with mixed fuzzy arc lengths", *Mathematical and Computer Modelling*, 57, pp.84-99, 2013
  - [10] M. Farhanchi, R. Hassanzadeh, I. Mahdavi, N. Mahdavi-Amiri, "A modified ant colony system for finding the expected shortest path in networks with variable arc lengths and probabilistic nodes", *Applied Soft Computing*, 21, pp.491-500, 2014.
  - [11] D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, Turkiye, 2005.
  - [12] L.A. Zadeh, "Fuzzy set", *Information and Control*, 8, pp. 338-353, 1965.
  - [13] L.A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex system". *IEEE Transaction on System Man and Cybernetics*, 1, pp. 28-44, 1973.
  - [14] Reglamento de Tránsito del Estado de Chiapas, Capítulo III, Artículos 45 y 46. 2014.
  - [15] M. Nabipour, M. Razaz, S.GH. Seifossadat, S.S. Mortazavi, "A novel adaptive fuzzy membership function tuning algorithm for robust control of a PV-based Dynamic Voltage Restorer (DVR)", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 53, pp. 155-175, 2016.
  - [16] Yongquan Zhou, Fahui Miao, Qifang Luo, "Symbiotic organisms search algorithm for optimal evolutionary controller tuning of fractional fuzzy controllers", *Applied Soft Computing*, 77, pp. 497-508, 2019.
  - [17] Thanachai Thumthawatworn, "Adaptive Membership Functions for Handover Decision System in Wireless Mobile Network", *Procedia Computer Science*, 86, pp. 31-34, 2016.
  - [18] A.O. Pizarro-Lerma, R. García-Hernández, V.A. Santibáñez, "Fine-Tuning of a Fuzzy Computed-Torque Control for a 2-DOF Robot via Genetic Algorithms", *IFAC*, 51, pp. 326-331, 2018.

## 6. Biografías

**René Carrillo-Pérez-Alfonzo** nacido en 1992. Ingeniero en Sistemas Computacionales, Egresado del ITTG. Actualmente buscando obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Elías Neftalí Escobar-Gómez** realizó la licenciatura en ingeniería industrial en producción en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y la licenciatura en ingeniería civil en la

Facultad de Ingeniería Civil de la UNACH. El Instituto Tecnológico de Orizaba le otorgó el grado de maestro en ciencias en ingeniería industrial, y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial le otorgó el grado de doctor en ingeniería. Es miembro de la línea de investigación optimización de productos y procesos, y de la línea de investigación de sistemas inteligentes. Actualmente es jefe de proyectos de investigación y profesor investigador del área de ingeniería industrial, profesor investigador de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, y miembro del IIE (Institute of Industrial Engineers) y del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

**Sabino Velázquez-Trujillo** realizó la licenciatura en ingeniería industrial en producción en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. El Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez le otorgó el grado de maestro en ciencias en ingeniería industrial, y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial el grado de doctor en ingeniería. Es miembro de la línea de investigación optimización de productos y procesos, y de la línea de investigación de sistemas inteligentes. Actualmente es profesor investigador de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

**Madain Pérez-Patricio** es profesor investigador del área de ingeniería en sistemas computacionales, de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro de la línea de investigación de sistemas inteligentes.

**Héctor Ricardo Hernández-de-León** es profesor investigador del área de ingeniería en electrónica, de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro de la línea de investigación de sistemas inteligentes, y miembro honorario del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

**Ricardo Enrique Olivera-Palacios** es Ingeniero Industrial, Egresado del ITTG. Actualmente buscando obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Carlos Venturino de-Coss-Pérez** es profesor investigador del área de ingeniería industrial en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro de la línea de investigación de optimización de productos y procesos.

**Carlos Pascacio-Vázquez** es estudiante del octavo semestre de la carrera de ingeniería industrial en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Carlos Alberto Gómez-Sánchez** es estudiante del octavo semestre de la carrera de ingeniería industrial en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial

# Aplicación Móvil para la creación de un mapa de incidencia criminal en el Estado de México mediante Procesamiento Digital de Imágenes y Redes Neuronales Artificiales

T. A. Lira-Baca<sup>1,a</sup>, R. Hernandez-Sanchez<sup>1,b</sup>, M. Borboya-Melchor<sup>1,c</sup>, D. Tinoco-Varela<sup>1,d</sup>, F. Gudiño-Peñaloza<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Depto. de Ingeniería, UNAM

<sup>a</sup> ITSE.LIRA@gmail.com, <sup>b</sup> ROBERTO.HER3130@gmail.com, <sup>c</sup> bm.mike07@gmail.com, <sup>d</sup> dativa19@hotmail.com,

<sup>e</sup> fernando.gudino@comunidad.unam.mx

**Resumen**— Debido a los altos índices de criminalidad presentes en diversas regiones del Estado de México se considera como un problema social de alto impacto el cual debe ser reducido. Asociado a los grupos criminales se encuentran una serie de marcas que pasando por grafitis se confunden como arte pero que son un indicativo de la zona de influencia de los grupos criminales. La aplicación de las técnicas de inteligencia artificial para resolver problemas de impacto social ha sido uno de los principales objetivos desde su concepción. Los sistemas de procesamiento de imágenes y reconocimiento inteligente de patrones son herramientas útiles para este fin. El presente trabajo desarrolla una aplicación móvil de alertas que identifica la zona por geolocalización e indica las marcas presentes que dan una idea del índice de peligrosidad de la zona, estos índices se obtienen de la correlación entre los grafitis presentes y los reportes de grupos criminales en la zona.

**Palabras clave.** Red Neuronal Artificial, Procesamiento de Imágenes, Abatimiento de criminalidad, Aplicación móvil, Web Services, trabajo en proceso

## 1. Introducción

Dentro del Estado de México existe un alto índice de inseguridad tal como lo reflejan los datos de la tasa de incidencia delictiva por entidad federativa de ocurrencia por cada cien mil habitantes reportada por el INEGI [9], en donde se demuestra un incremento delictiva latente en los últimos 6 meses, por otra parte se observa que en los municipios con mayor incidencia delictiva, son aquellos en los cuales la proliferación de pseudo-arte en forma de grafiti ha aumentado.

Este tipo de arte clandestino se ha utilizado históricamente para delimitar los territorios de influencia de los diversos grupos delictivos. Con base a las diferentes marcas se podrá realizar un mapeo entre dichas marcas y los altos índices delictivos presentes en las diferentes regiones del estado y visualizar el crecimiento de las diferentes incidencias delictivas. Tal como se muestra en la TABLA I.

El procesamiento digital de imágenes es una herramienta que nos permite detectar dentro de un área de interés en una imagen aquella información útil para la extracción de información relevante, por ejemplo, la determinación de profundidad de color nos permitirá calcular el tiempo de vida del grafiti, mientras que un sistema de mejoramiento de

imágenes y localización de regiones de interés, nos permiten definir áreas en las cuales podemos encontrar grafitis pertenecientes a diversos grupos criminales.

Así mismo, los sistemas de clasificación basados en técnicas de inteligencia artificial tal como una red neuronal artificial nos permitirá agrupar en categorías a los diferentes conjuntos de marcas para crear un mapa virtual de los grupos delictivos delimitando las zonas de influencia.

Por otra parte el auge de los dispositivos móviles actuales nos permiten acercar las técnicas de inteligencia artificial aplicadas en un problema de interés general que puede ser atacado por diversos frentes, en este caso mediante la prevención de delitos.

TABLA I. DELITOS DE ALTO IMPACTO REPORTADOS EN EL ESTADO DE MÉXICO POR CADA 100MIL HABITANTES

DELITO	CASOS REGISTRADOS (2019)	CRECIMIENTO PORCENTUAL
ROBO	11,159	-13.8
SECUESTRO	19	35.7
LESIONES	142	91.2
EXTORSION	142	91.9
HOMICIDIO	292	12.7

## 2. Sistema de Reconocimiento de imágenes

Un sistema de reconocimiento de imágenes típicamente está conformado por los siguientes partes [3,10].

**Adquisición.** Se refiere al proceso de convertir un documento a una representación apta para ser procesada por la computadora. Tal adquisición y conversión puede ser realizada por un escáner, cámara fotográfica o de video, etc. y el

resultado puede variar dependiendo del proceso de digitalización usado y el método de codificación [10]. *Binarización.* La binarización es muy utilizada en la reproducción de imágenes, en la visión artificial y en la segmentación y reconocimiento entrópico de caracteres (OCR). Convierte la imagen recibida en una imagen binaria separando así el fondo de los objetos a analizar [10]. *Normalización.* Trata de ajustar la forma, tamaño y posición esto con el objetivo de minimizar la variación entre imágenes de la misma clase [10].

### A. Procesamiento Digital de Imágenes

Es un conjunto de técnicas y procesos utilizados para descubrir o hacer resaltar información contenida en una imagen usando como herramienta principal una computadora se le conoce como procesamiento digital de imágenes (PDI)[11]. Los objetivos del PDI se basa en dos áreas de aplicación primordiales: El mejoramiento de la calidad de la información contenida en una imagen[11].

Entre las aplicaciones del PDI están el reconocimiento de patrones, el cual se refiere al procesamiento de la imagen resultante del proceso de deconvolución. En esta imagen se manipulan para mejorar la lectura de la misma e identificar propiedades que pudiesen tener algún significado. La manipulación se lleva a cabo a través de tres subprocesos: resaltamiento de la imagen, reducción de ruido, segmentación y detección de bordes.

El propósito de las técnicas de realce de la imagen es mejorar la apariencia de la misma para el observador. La selección de los métodos apropiados y la elección de los parámetros adecuados dependen de la calidad de la imagen original y de la aplicación. Entre las técnicas de realce están: Transformaciones puntuales[11]. Transformaciones locales[11], Transformaciones globales[11] y Transformaciones geométricas.

### B. Redes neuronales artificiales (RNA)

Una RNA son sistemas de procesamiento de la información cuya estructura y funcionamiento están inspirados en las redes neuronales biológicas [7]. Consisten en un gran número de elementos simples de procesamiento llamadas neuronas que están organizados en capas. Cada neurona está conectada con otras neuronas mediante enlaces de comunicación, cada uno de los cuales tiene asociado un peso. Dichos pesos representan la información que será usada por la red neuronal para resolver un problema determinado.

Así, las RNA son sistemas adaptativos que aprenden de la experiencia, esto es, aprenden a llevar a cabo ciertas tareas mediante un entrenamiento con ejemplos ilustrativos.

Mediante este entrenamiento o aprendizaje, las RNA crean su propia representación interna del problema.

Entre las arquitecturas de RNA más conocidas están el perceptrón multicapa MLP[7], los mapas auto organizados de Kohonen[5,7], las redes de Hopfield[7], por mencionar solo algunos de ellos. En general cualquier sistema de RNA puede utilizar distintos paradigmas para el aprendizaje de la red, al igual que distintos tipos de entrenamiento. Tal como se observa en la Fig. 1.

Una de las técnicas más utilizadas para el entrenamiento de Redes Neuronales artificiales es Backpropagation, un método de cálculo del gradiente utilizado en algoritmos de aprendizaje supervisado utilizados para entrenar redes neuronales artificiales[7]. El método emplea un ciclo propagación (adaptación de dos fases). Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas siguientes de la red, hasta generar una salida.

La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas. La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada. Después del entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que contenga ruido o que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas individuales hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento.

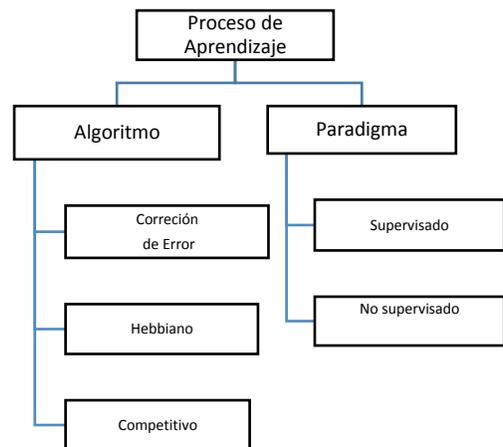


Fig. 1. Proceso de Aprendizaje en RNA.

### 3. Sistema de mapeo de criminalidad basado en grafitis

La creación de un Sistema de mapeo de criminalidad se desarrolla en diversas etapas, tal como se muestra en la figura 4. En este momento el Desarrollo del Proyecto se encuentra en la construcción del Sistema de la aplicación final y en una etapa de pruebas de geolocalización.

El Sistema se desarrolla de acuerdo a las siguientes etapas. Primeramente se realiza el procesamiento de las señales en 5 fases: adquisición, pre- procesamiento, mejoramiento de las imágenes, determinación de regiones de interés y extracción de características. En la segunda etapa, se realiza la implementación del sistema de clasificación por redes neuronales artificiales y finalmente en la última etapa se implementa la solución en un servidor y se explota un servicio web mediante un dispositivo móvil, tal como se observa en la TABLA II.

TABLA II. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MAPEO DE GRAFITIS

Etapa	Descripción	Componentes				
I	Procesamiento de Imágenes	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$
II	Red Neuronal Artificial	$II_1$	$II_2$		$II_3$	
III	Sistema Movil	$III_1$			$I_2$	

$I_1$  es la adquisición de imágenes,  $I_2$  es el preprocesado de las mismas,  $I_3$  es el mejoramiento de imágenes,  $I_4$  representa la selección de ROI y  $I_5$  es la extracción de características. Por otra parte  $II_1$  representa el preprocesado de datos de entrada,  $II_2$  es el entrenamiento de la RNA y  $II_3$  es la ejecución de la misma. Finalmente  $III_1$  es el desarrollo del servidor Web y  $III_2$  es la aplicación móvil final.

#### A. Sistema de Procesamiento y mejoramiento de Imágenes

En esta etapa se definieron las propiedades de captura de imagen, la resolución y profundidad de bit para las diversas tomas, así mismo se redimensionaron las imágenes para tener un estándar de calidad durante todo el proceso [6,8,12]. Adicionalmente dentro de esta etapa se aplicaron diversas técnicas de realce. En primer lugar se realizó un análisis de la composición de color de las imágenes, Fig. 2, con el fin de determinar la profundidad de índices de tonalidad dependen del fondo que se tiene, tal sea el caso de si la pared es blanca, gris, etcétera. Sin embargo, la intensidad es permanente en superficies iguales, por lo cual se puede establecer una correlación entre los colores sin importar el tipo de muro o tonalidad del mismo [11].

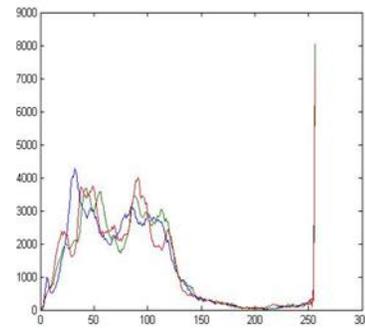


Fig. 2. Análisis de los componentes de color de un grafiti

El proceso de binarización es una técnica de segmentación que se emplea cuando existe una gran diferencia entre el objeto de análisis y el fondo de la imagen, evaluando la similitud y las diferencias entre los píxeles en escalas de grises, consiste entonces, en establecer un umbral óptimo que permita la mejor separación del objeto [11].

Como paso consecuente se convirtió a las imágenes de escala RGB a escala de Grises, y se ecualizó el histograma para mejorar las diferencias y lograr así una segmentación más clara. Posteriormente se convirtió a una imagen binaria. El resultado del procedimiento se visualiza en la Fig. 3.

Posteriormente se aplicó un filtro de detección de cotornos tipo Sobel[11] a la imagen, esta decisión se tomó dado que experimentalmente y desde un punto de vista de subjetivo fue el filtro que mejor definición de las áreas contiguas tenía.

A continuación se marcaron regiones de al menos 30X 50 píxeles y menores a 300X150 píxeles que fueran dominantes en la imagen, con esto se pretende eliminar regiones del fondo muy similares, por ejemplo postes de luz, cortinas de negocios, o vidrios, cuyas dimensiones pueden competir con las posibles regiones de interés. De esta manera se garantiza que únicamente las áreas con probabilidad de contener grafitis sean conservadas.

Para el etiquetado se utilizó conectividad de 8, es decir que los 8 píxeles contiguos al de interés tuvieran un valor igual y posteriormente se aglomeraron las regiones que tuvieran un coeficiente igual en regiones más grandes hasta obtener las adecuadas. Una vez definidas las regiones se recortaron de la imagen original, dando como resultado una región con alta probabilidad de contener un grafiti. Los resultados finales del procedimiento se observan en la Fig. 4.



(A)



(B)



(C)

Fig. 3. Procedimiento de conversión. En (A) imagen original. En (B) imagen en escala de grises. En (C) imagen binarizada después de eualización de histograma.

Una vez obtenido los grafitis estos se guardan como matrices de dimensión 360 por 150 pixeles que son alimentados a la red neuronal en forma de vectores de datos binarios.

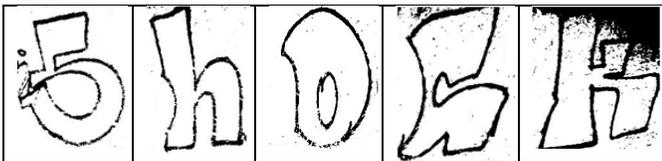


Fig. 4. Delimitación de una región de tamaño 38X53 pixeles

#### B. Sistema de clasificación con MLP

Actualmente esta etapa se encuentra en desarrollo, el sistema se ejecutara de dos modos: en el primero la idea es crear un sistema que tome la localización del dispositivo Para la creación del sistema de red neuronal se realizaron 3 etapas: la primera es una etapa de pre- procesamiento, para reducir la

dimensionalidad de los vectores de entrada; la segunda es la etapa de entrenamiento de la red neuronal; y por último se encuentra la etapa de evaluación del sistema. Para ello se estableció que el número de clases es de 180, correspondientes al numero de muestras totales menos aquellas que se repetían determinado por un coeficiente de similaridad [1,4,7].

Se generó un descriptor de características al aplicar PCA a los vectores de entrada y se aplico un discriminante lineal [2,8]. El Análisis Discriminante Lineal (LDA) per-mite tomar dicho vector y reducir la dimensionalidad, seleccionando un número inferior de características formadas como combinación lineal de las originales, las cuales proporcionan la mayor información discriminante.

Luego de realizar LDA y aplicar una regresión lineal a las características obtenidas, para analizar el aporte de cada una de las características originales, se obtuvieron 179 funciones discriminantes es decir, el número de clases menos uno, que sepa-ran linealmente cada una de las clases. Este análisis mostró que las características menos relevantes pueden ser omitidas y reducir los vectores originales de entrada de 360 X 150 a vectores de 120X70.

Por lo tanto se construyó una red neuronal con 8400 entradas, equivalente al número de componentes creados en el PCA, con 8 neuronas de salida lo que genera 256 posibles salidas siendo las 76 restantes inhabilitadas, en la capa oculta se utilizaron 5600 neuronas. El algoritmo Backpropagation [4,7] se utilizó como método de entrenamiento de la red.

El primer paso en la aplicación de este método consiste en la generación aleatoria del conjunto de pesos de la red neuronal. El valor de inicialización está dado por una distribución uniforme, y cuyo rango de valores óptimos es un parámetro en estudio. Adicionalmente se consideraron los parámetros de la TABLA III.

TABLA III. PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA RED NEURONAL BAJO EL ALGORITMO BACKPROPAGATION

Parámetro	Valor
Cantidad de ciclos ( epochs)	2000
Error máximo admisible	0.05
Umbral de acierto	0.35
Tasas de aprendizaje ( $\alpha$ )	{0.01, 0.05, 0.1, 0.25}
Taza de momento ( $\beta$ )	{0, 0.01, 0.05, 0.1}

Para poder evaluar las características de la red obtenida se particionó el set de da-tos en dos subconjuntos: el subconjunto de entrenamiento y el subconjunto de evaluación. El primer subconjunto se utilizó para realizar el entrenamiento de la red, mientras que el segundo subconjunto se utilizó para evaluar la red obtenida. Se realizaron 3 experimentos, los dos primeros con 100 muestras cada uno y el ultimo con los 200 ejemplos.

El particionamiento se realizó de manera tal que los subconjuntos resultantes sean representativos, es decir, que posean las mismas características que el conjunto original.

Para la primera y segunda serie de experimentos se utilizó el mismo particionamiento del conjunto de datos. Se toman aleatoriamente el 65% de los ejemplos para entrenamiento y se dejan un 35% de ejemplos para evaluación. Finalmente se particionó nuevamente el conjunto de datos, tomando en este caso el 80 % de los ejemplos para entrenamiento.

### C. Implementación del Sistema de mapeo y geolocalización

Actualmente esta etapa se encuentra en desarrollo, el sistema se ejecutara de dos modos: en el primero la idea es crear un sistema que tome la localización del dispositivo móvil y mande como referencia los grafitis que se pueden asociar a grupos delincuenciales, cabe recordar que no todos los grafitis son creados por grupos criminales, e esta manera el usuario podrá recordar aquellas imágenes que indiquen un peligro para el y tomar las precauciones debidas.

El otro modo de operación es la captura de una imagen de un grafiti y enviar la consulta al sistema, con lo cual el usuario podrá saber si este pertenece a un grupo criminal o no. Así mismo la base de datos se amplía y el sistema se mantiene actualizado [10].

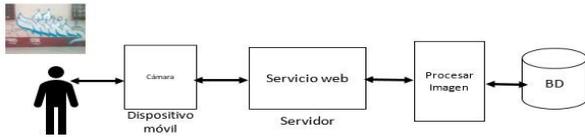


Fig. . 5. Modo de operación del Sistema de usuario: modo captura y actualización.

## 4. Experimentos y Resultados

Tal como se indico anteriormente, el sistema se encuentra en la etapa final de desarrollo, por el momento únicamente se tiene los resultados del sistema de procesamiento de imágenes y del sistema de clasificación de la red neuronal.

Actualmente se cuenta con una base de datos de 500 imágenes de seis municipios correspondientes a diversas regiones del Estado de México : Atizapán, Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli, Ecatepec, Naucalpan y Nicolas Romero. De los cuales se tienen datos de la probable creación de los grafitis en un 15% de los casos y se han identificado la participación de al menos 10 grupos delictivos, incluyendo algunos de cobertura tanto regional como nacional. Se omiten datos de los mismos por cuestiones de seguridad.

TABLA IV. RESULTADOS DE LA SEGMENTACIÓN E IDENTIFICACION DE GRAFITIS

Parámetro	Valor
Promedio de grafitis por imagen	1.2
Grafitis identificados y etiquetados correctamente(%)	97
Grafitis descartados erróneamente(%)	3
Regiones clasificadas erróneamente(%)	2
Regiones descartadas correctamente(%)	98

En cuanto la capacidad de identificación de los grafitis se procesaron para este experimento 200 muestras y los resultados se ven reflejados en la Tabla 5. podemos observar que la precisión y exactitud del Sistema son altos con una baja razón de falsos positivos.

Por último los resultados del sistema de clasificación por medio de RNA se observan en la Tabla 6 y la Fig. 6 . Este sistema se probó con las mismas 200 muestras utilizadas para el experimento anterior.

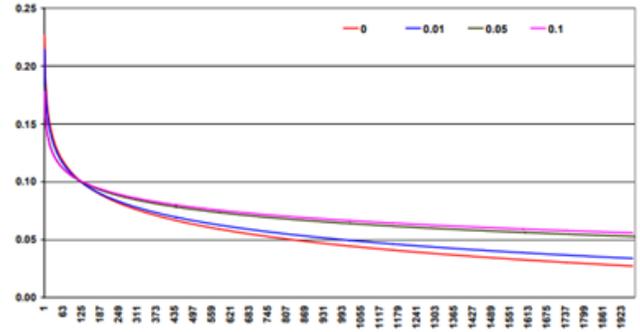


Fig. 6 Curva del error de entrenamiento para una tasa de aprendizaje = 0.1 y diversos valores de momentos, en el eje vertical se expresa el error cuadrático medio, en el eje horizontal el tiempo de entrenamiento en segundos hasta alcanzar las 2000 épocas

De los datos obtenidos en la Tabla 6 y la Figura 10 podemos ver un desempeño bajo en la etapa de validación. Pero un comportamiento global aceptable. El Sistema podría mejorar si se agrega una etapa de optimización, por ejemplo mediante un Algoritmo Genético.

## 5. Conclusiones

El procesamiento de imágenes para geolocalización es, a grandes rasgos, software diseñado para recopilar información de fotografías de grafitis, con el propósito de generar delimitaciones de zonas de riesgo dentro del mapa del Estado de México. Esto logrado gracias a la codificación, en formato escala de grises y binario, de las fotos recopiladas con diversos modelos de Smartphone. Una vez que estén codificadas, con el fin de adquirir información lo más limpia posible, pasan por una etapa de filtración para eliminar datos que no sean de interés.

Utilizando un sistema de red neuronal multicapa, un proceso de aprendizaje y clasificación entra en marcha con el propósito de guardar tanto la información de origen como la obtenida del proceso dentro de una base de datos. Y para finalizar, la siguiente fase se encarga de procesar los datos para posicionar dentro del mapa las zonas de riesgo.

Tanto el software, así como cada una de las etapas que lo conforman, demuestra ser sólido en cuanto al tratado de la información base, puesto que los procesos son parte de una tecnología existente, estable y explorada a pleno, sin mencionar el gran auge en los últimos años.

Contextualizando dentro de la época, circunstancias y entorno social, es fácil orientar la idea hacia el usuario promedio, puesto que un alto porcentaje poblacional cuenta con algún tipo de dispositivo móvil, el cual, optimizado mediante una app, será de utilidad en cuanto a reunir la información. El beneficio al usuario es el fácil acceso a los mapas, para su uso preventivo en primera instancia, facilitando su seguridad e integridad.

## 6. Referencias

- [1] S- Behnke, Hierarchical Neural Networks for Image Interpretation, volume 2766 of Lecture Notes in Computer Science. Springer,2003.
- [2] F. Cruz, E.F. Simas Filho, M.C. Albuquerque, I.C. Silva, C.T.T. Farias, and L.L. Gouvêa, Efficient feature selection for neural network based detection of flaws in steel welded joints using ultrasound testing. Ultrasonics, 73, 1-8, 2017.
- [3] S. Cubero, n. Aleixos, E. Moltó J Gómez-Sanchis, and J. Blasco, Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. Food and Bioprocess Technology, 4(4), 487-504,2011.
- [4] L. Fausett, . Fundamentals Of Neural Networks: Architectures, Algorithms, and Applications.., New Jersey, USA: Prentice-Hall,1994.
- [5] K. Fukushima., Neocognitron: A self-organizing neural network for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. Biological Cybernetics, 36(4):193–202,1980.
- [6] S. Hantson, E. Chuvieco, X. Pons, C. Domingo, C. Cea, G. Moré and J.A. Tejeiro, Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. Revista de Teledetección, 36, 51-61,2011.
- [7] S.S. Haykin, Neural networks and learning machines/Simon Haykin. New York: Prentice Hall,2009.
- [8] Hoyer and Hyvarinen, Independent component analysis applied to feature extraction from colour and stereo images. Network: Computation in Neural Systems, 11(3):191–210,2000.
- [9] INEGI, Información acerca del número de eventos individuales de victimización delictiva reportados. Mexico, 2018. <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/incidencia/>
- [10] D. Nieto, Sistema de reconocimiento de kanjis japoneses basado en procesamiento digital de imágenes aplicado a dispositivos móviles,2016. [http://caterina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lis/nieto\\_b\\_d/capitulo\\_2.pdf](http://caterina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lis/nieto_b_d/capitulo_2.pdf)
- [11] L. Richardson and S.Ruby, RESTful web services. O'Reilly Media, Inc.2016.
- [12] J.C. Russ, The image processing handbook. CRC press,2016.
- [13] V.M. Sánchez-Valdés, ¿Por qué aumentó la violencia en el Edomex? Animal Político,2014. <https://www.animalpolitico.com/el-blog-de-causa-en-comun/por-que-aumento-la-violencia-en-el-edomex/>

## 7. Biografías

**Tania Abigail Lira Baca.** Estudiante de la licenciatura en Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas Electrónicos en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, se interesa en sistemas de control robóticos, sistemas inteligentes.

**Roberto Hernández Sánchez.** Actualmente estudia la licenciatura en Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas Electrónicos en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, sus intereses se centran en electrónica y robótica aplicada.

**Miguel Angel Borboya Melchor.** Estudia la licenciatura en Ingeniería en Telecomunicaciones y Sistemas Electrónicos en la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, las áreas de interés van desde los sistemas inteligentes hasta los sistemas de procesamiento de señales.

**David Tinoco Varela.** Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, Obtuvo el título de Maestro en Ciencias Computacionales y el Doctorado en la misma área por la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente profesor del departamento de ingeniería de la Fes Cuautitlán, sus intereses se centran en los sistemas criptográficos, áreas de inteligencia artificial y sistemas embebidos.

**Fernando Gudiño Peñaloza.** Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán de la UNAM, Obtuvo el título de Maestro en Ciencias de la computación y el Doctorado en Ciencias Computacionales por el Tecnológico de Monterrey. Actualmente profesor del departamento de ingeniería de la Fes Cuautitlán, sus intereses se centran en áreas de inteligencia artificial, sistemas de automatización y sistemas embebidos.

# Structure prediction of the human GPN-Loop GTPases protein family using Protein Structure Prediction Server and Pymol

J. Juárez<sup>1,a</sup>, M.R. Guevara-Villa<sup>2,b</sup>, J. Newton<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería en Sistemas Computacionales, Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla

<sup>2</sup> Ingeniería industrial, Universidad Politécnica de Puebla

<sup>3</sup> Cornell Health, Cornell University

<sup>a</sup> jorge.jaime@metropoli.edu.mx, <sup>b</sup> maria.guevara495@uppuebla.edu.mx, <sup>c</sup> jmn38@cornell.edu

**ABSTRACT**—We take the sequence of the GPN family proteins, these are essentials for cellular division, and they were analyzed using Protein Structure Prediction Server version 3.0. The data obtained was modeled with PYMOL software to describe their structure and were correlated using dynamic light scattering to know the size and structure of the GPN proteins.

*Keywords.* Modeling, PYMOL, prediction server, proteins, dynamic light scattering.

## 1. INTRODUCTION

The RNA polymerase II (Pol II) makes the transcription of the genes that coding proteins, this mechanism has been studied [1] and we unknown the biogenesis process. The Pol II conformation complex needs many transcription factors and many proteins are involved for the correct function [2]. It has been demonstrated that GPN-loop GTPase 2 (GPN2) [3] and the GPN-loop GTPase 3 (GPN3/Parcs) [3], [4], [5] are subcomplex binding to Pol II [3], [6] and they are fundamental in the biogenesis process ([7]). Phylogenetic studies shown that proteins are evolved from common archeal ancestor and these proteins are universal conserved in all eukaryotic cells ([8], [9], [10]) and their function are unknown ([11], [12]) if these proteins are not expressed are lethal for the cells and die; for that these are essential proteins [3]([11]). These proteins have the five characteristics motives of all GTPases ([13]) named G1, G2, G3, G4 and G5 besides have three amino acids glycine, proline and asparagine and they are called GPN proteins ([8], [13]). Bioinformatic studies shown that GPN3 and GPN2 belong to the same interaction web ([14]). It has demonstrated that GPN2 interact with other subunits of RNA polymerase II and is necessary for cohesion between chromatids into the nucleus of the cell keeping chromosomal stability ([3], [8], [15], [16], [17], [18]).

To know the protein structure will allow to predict their function into biogenesis of RNA polymerase II.

In this study we put the sequence of the three GPN proteins family into (PS)2-v3 Protein Structure Prediction Server ([19]) the sequence obtained was put into Pymol software to model the protein and to know their possible structure. Later we create the recombinant proteins of the GPN family in Escherichia coli bacteria and proteins purified were analyzed by Dynamic Light Scattering to know size and

molecular parameters for compare with the structure predicted..

## 2. METHODOLOGY

A. Molecular modeling of GPN1, GPN2 and GPN3 proteins.

The genetic sequence of the GPN proteins family in FASTA format ([20]) were introduced into server predictor Protein Structure Prediction Software PS2 version 3.0 ([21], [22]) and we obtained files in format PSE and PDB. These new files were loaded into PYMOL software ([23], [24]) for make a molecular representation.

B. Molecular analysis of GPN1, GPN2 and GPN3 proteins interaction.

We use the VISANT software ([25], [26]) to identify the interaction between GPN proteins family and other proteins reported in the protein data bank. VISANT can visualize all experiment made in molecular biology laboratories and the interactions between these proteins.

C. Construction of expression vectors for the GPN protein family.

Genes encoding GPN with hexahistidines were cloned into pET28-DL3 vectors. Sequences of genes encoding GPN proteins were obtained from human cDNA library (Open Biosystems, US) and put into Escherichia coli bacteria following methodology of human hisGPN1 of ([27]).

D. Preparation of His-bind column

100 µl of resin (kit His-Bind-Novagen with nickel sulfate) and 25 µl of nickel was loaded into an Eppendorf tube followed by equilibration of buffer with 75 µl of 100 mM Tris-HCl with 100 mM KCl (8,2 pH) rotated by 15 minutes. After that the column has been washed with 10 ml of the same buffer.

**E. Expression and purification of GPN proteins family from supernatant**

*E. coli* bacteria strain (DL3) transformed with the expression vector encoding the gene *hisGPN* was grown 37°C in 600 ml of LB medium in a litter flask with 100 µM ml<sup>-1</sup> kanamycin until early stationary phase. To induce expression of the proteins were added Isopropyl β-D-1-thiogalactopyranoside (IPTG) to a final concentration of 200 µM, and the culture was grown for 24 h at 10°C. Cells were harvested by centrifugation at 4°C and 13.000 rpm for 15 minutes and resuspended in a buffer comprised of 100 Mm Tris-HCl 100 Mm KCl lysine and sodium glutamate 100 mM equimolar to Ph 8,2. The suspension was sonicated followed by centrifugation at 13.000 rpm for 15 min at 4°C. The supernatant was loaded onto a column with 100 µl of resin, mixed and rotated during 20 min. After the column has been washed with 10 ml of the same buffer with amino acids or 80 Mm imidazole, the adsorbed protein was eluted with a buffer contained 300 mM imidazole, 100 mM Tris-HCl, 100 mM KCl (pH 8,2). The samples were assayed in SDS-PAGE 10%, the gel was stained with Coomassie blue.

**F. Protein assay**

We quantified protein concentration by Bradford method (Bio-Rad Protein assay). This measure was carried out according to the manufactured instruction (Bio-Rad). Protein concentration was measured by absorbance at 595 nm.

**G. Dinamic Light Scattering (DLS) analysis**

DLS experiments were done in a Malvern Nano S (Malvern, Ltd) instrument equipped with laser NIBS (Non Invasive Back Scattering) technology at a wavelength of 663 nm and a Peltier temperature controller. Protein solution was filtered through a 0,02 µm pore size Anotop ® syringe filter (Whatman, GE) prior to the measurements. The hydrodynamic radius (Rh) was calculated using the Zeta Sizer software provided with the equipment.

**3. RESULTS AND DISCUSSION**

The only known GPN1 protein crystal (*Pyrococcus abyssi*) exist in form of dimer ([13]) and not in monomer form. The sequence of the GPN proteins family was introduced into PS2 (Protein Structure Prediction Server) version 3.0 ([19]). The templates obtained for the GPN proteins family shown in figure 1 (GPN1), figure 2 (GPN2) and figure 3 (GPN3).

The GPN1 is the most weight protein of the three with 41 Kilodaltons (KD), although is more similar to 1yrbB protein in PSI-BLAST and IMPALA analysis the automatic selected

template for this protein was 2qm8A that correspond to a chaperone of *Methylobacterium extorquens*, ([28]).

Meanwhile the GPN2 and GPN3 have almost the same weight (34 and 33 KD respectively). These proteins have a great coincidence of 22 and 23 percent of both with the GPN of *Pyrococcus abyssi* with the template 1yrbB that belong to archaea. Although this protein is an GTPase in dimer form has the most sequences of the GPN2 and GPN3 proteins ([13]). Probably this similarity is due to the length of the protein or a better coincidence. The GPN1 has 374, 1yrbB has 262, GPN2 has 310 and GPN3 has 284 amino acids, almost the same number or amino acid than archaea. This can explain his scores, the GPN3 has the best score with 228 than GPN2 (225) or GPN1 (189). For this reason, we believe that the protein size is a very important parameter for the prediction of the structure of the proteins and is corroborate with error calculus by the servers where the worst error was for the GPN1 with 6x10<sup>-49</sup> instead of GPN2 with 1x10<sup>-59</sup> and GPN3 with 6x10<sup>-60</sup>.

**(PS)<sup>2</sup>: Protein Structure Prediction Server**

**Structure Template(s)**

Automatic selected template

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input checked="" type="checkbox"/> 2qm8A	16	52	3e-07	alignment

From PSI-BLAST

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	27	189	6e-49	alignment
<input type="checkbox"/> 1g7sA	20	85	2e-17	alignment
<input type="checkbox"/> 1ionA	17	50	5e-07	alignment
<input type="checkbox"/> 1g3qA	18	50	7e-07	alignment
<input type="checkbox"/> 2p67A	33	42	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1skqA	17	42	2e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1wb1C	21	42	2e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1wb1B	21	41	3e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1f0A	15	41	3e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1vmaA	29	41	4e-04	alignment

From IMPALA

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	25	247	4e-66	alignment
<input type="checkbox"/> 2npiA	13	150	5e-37	alignment
<input type="checkbox"/> 1mkyA	18	52	2e-07	alignment
<input type="checkbox"/> 2qm8A	16	52	3e-07	alignment
<input type="checkbox"/> 2qu8A	14	46	1e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 2e87A	15	46	2e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 1egaB	17	43	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 2f5B	13	43	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 2hjqA	13	43	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1zo1I	22	43	1e-04	alignment

Figure 1. Templates of GPN1 protein obtained from (PS)<sup>2</sup>-v3 Protein Structure Prediction Server ([19])

**(PS)<sup>2</sup>: Protein Structure Prediction Server**

**Structure Template(s)**

Automatic selected template

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input checked="" type="checkbox"/> 1yrbB	23	225	1e-59	alignment

From PSI-BLAST

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	22	187	2e-48	alignment
<input type="checkbox"/> 2p67A	22	42	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1g7sA	16	42	2e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 2qm8A	44	40	3e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1wcv1	46	40	4e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1vmaA	33	39	8e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1hn5B	23	39	8e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1ionA	26	39	0.001	alignment
<input type="checkbox"/> 1ihuA	33	38	0.002	alignment
<input type="checkbox"/> 2ewwA	21	38	0.002	alignment

From IMPALA

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	23	225	1e-59	alignment
<input type="checkbox"/> 2npiA	11	137	3e-33	alignment
<input type="checkbox"/> 1xjcA	31	44	5e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 2qm8A	30	44	5e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 1wcv1	26	44	8e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 2ozaA	15	43	8e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 3c9uA	41	43	9e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 1rz3A	38	42	2e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 2flrA	48	42	3e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1ionA	26	41	3e-04	alignment

Figure 2. Templates of GPN2 protein obtained from (PS)<sup>2</sup>-v3 Protein Structure Prediction Server ([19])

However, although these three proteins, GPN1, GPN2 and GPN3 were evolving of common ancestor of archaea, the best coincidence with was for GPN1 with 27 percent, this is possible because is the same protein but of different species.

The templates obtained with the server were analyzed by Pymol software ([23], [24]), the modeling of the proteins are showed in figure 4, the structure predicted of three proteins were similar to GPN of *Pyrococcus abyssi* with a fold structure of Rossmann type, this mean that the proteins are composed alternating alpha helix (white color) and beta sheets (red color). The structure that server cannot make prediction are colored in green.

Nevertheless, only at less of 25 percent were predicted with the server, so in the pymol modeling we have a poor structure predicted, the worst was the GPN1 protein. The unknown structure colored in green we hope that missed parts has a Rossman type.

The GPN2 and GPN3 have 5 beta sheet, instead the GPN1 only has 2 but with less size, comparing between the three proteins we are sure that the most no predicted structure

(green color) in GPN2 has a beta sheet form. The server can predict the alpha helix of all proteins (figure 4, 5, 6).

**(PS)<sup>2</sup>: Protein Structure Prediction Server**

**Structure Template(s)**

Automatic selected template

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input checked="" type="checkbox"/> 1yrbB	23	226	6e-60	alignment

From PSI-BLAST

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	23	192	5e-50	alignment
<input type="checkbox"/> 1g3qA	20	47	4e-06	alignment
<input type="checkbox"/> 1ionA	21	46	8e-06	alignment
<input type="checkbox"/> 2afhE	27	42	8e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 2p67A	29	41	2e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1hn5B	30	40	4e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1g7sA	16	40	4e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1cp2A	19	39	6e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1wcv1	34	39	8e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 2qm8A	32	39	0.001	alignment

From IMPALA

Templates	Identity	Score	E-value	Alignment
<input type="checkbox"/> 1yrbB	23	226	6e-60	alignment
<input type="checkbox"/> 2npiA	11	144	2e-35	alignment
<input type="checkbox"/> 2e87A	14	44	3e-05	alignment
<input type="checkbox"/> 1ihuA	9	43	1e-04	alignment
<input type="checkbox"/> 1wcv1	22	37	0.008	alignment

Figure 3. Templates of GPN3 protein obtained from (PS)<sup>2</sup>-v3 Protein Structure Prediction Server ([19])

This models with pymol shown that GPN2 and GPN3 are similar and the server can predict many structures.

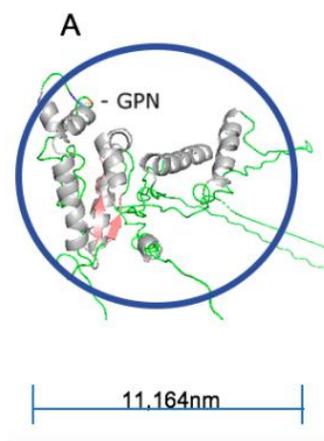


Figure 4. Structure predicted for the GPN1 (A) modeling with Pymol software

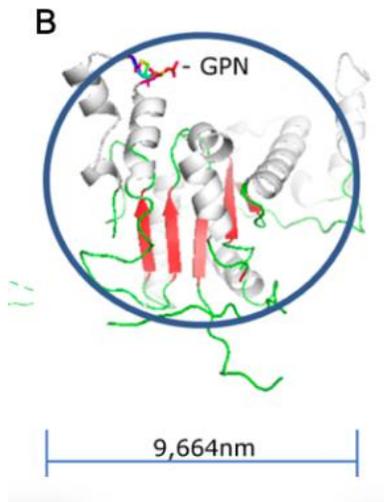


Figure 5. Structure predicted for the GPN2 (B) modeling with Pymol software

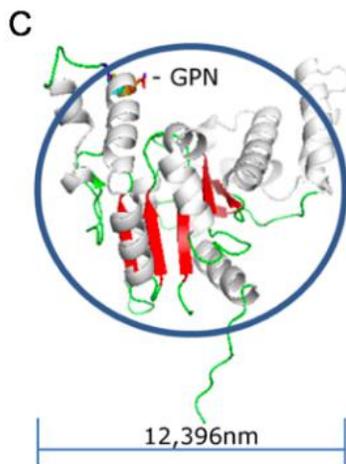


Figure 6. Structure predicted for the GPN3 (C) modeling with Pymol software

Another hand, the GPN1 has the unknown structure, this is possible because phylogenetic studies of GPN shown that have a common ancestor from archaea ([8], [9], [10]) and they are conserved in all eukaryotic cells, so we suppose that the evolution made many changes into structure of GPN1 but no many differences in GPN2 and GPN3 this is possible because GPN2 and GPN3 are complementaries to GPN1 and this is the principal protein for metabolism of the cell and GPN1 has had many evolutionary changes that are requirements for the cell functions.

We use the VISANT software for create a representation in a graph of the GPN protein family interactions with other proteins reported in this data base (figure 7). GPN proteins have been found in the RNA polymerase II biogenesis, these proteins have unknown function and are essentials for the live cell. If this proteins are not expressed then the cell died. With VISANT we can show that GPN protein family interact between them. The GPN1 has 10 proteins interactions with GPN2 and 4 proteins with GPN3. GPN2 has 5 protein interaction with GPN3, and the three has interaction with one. Eight proteins belong to RNA polymerase II biogenesis that interact with the family of GPN proteins. This interaction have not function demonstrated yet.

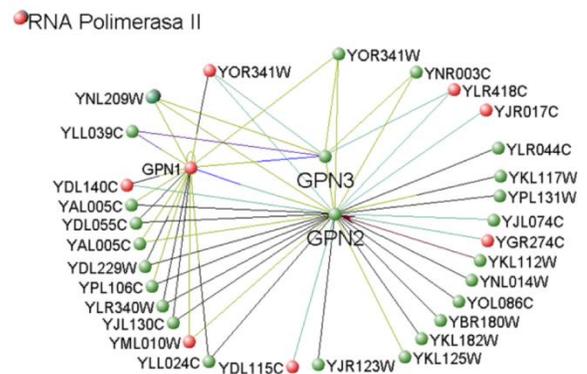


Figure 7. Graph about representation of GPN proteins interaction reported in data base VISANT. Red proteins belongs to RNA polymerase II biogenesis.

To verify the expression of GPN in E. Coli, we make the test of expression and purification with Immobilized Metal Affinity Chromatography (IMAC) in the biotechnology laboratory. The electrophoresis of the samples was staining using coomasic blue. The lanes obtained represent the essential proteins expressed in the bacteria with GPN1, GPN2 and GPN3 expressed like recombinant proteins (lanes 1, 2 and 3, respectively in figure 8). We can show that GPN protein family was expressed because is compared with lane 4, here the recombinant proteins were not expressed.

To identify that GPN protein was expressed, we design a software to compare the image of the gel SDS-PAGE, the image was binarized, changed the umbral and compare the histograms. In image 9 we show in A the lane with GPN2 expressed and the lane with recombinant protein not expressed, in B is the image A later of the digital image processing and we use this image obtained for calculate the

histogram, we compare the two lanes subtracting the values obtained in their histogram, if the protein is not expressed then we get an almost zero number but when we have a numerical value then we mark with a red line the value obtained like is showed in C in figure 9 meaning that we found a recombinant protein expressed into the gel SDS-PAGE.

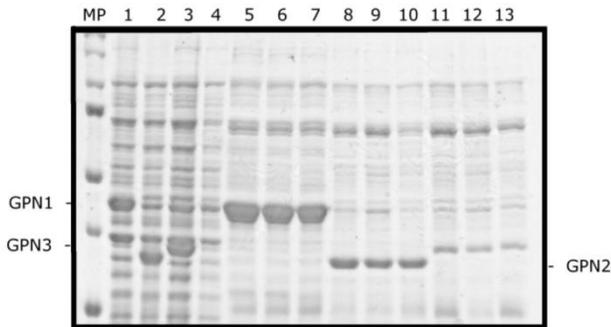


Figure 8. Expression and purification of GPN human proteins. SDS-PAGE stained with coomassie blue. Protein marker (MP); positive and negative expression of GPN1, GPN2 and GPN3 proteins respectively (lanes 1-4); IMAC purification of GPN1 (lane 5) GPN2 purification (lane 8), GPN3 purification (lane 11). Lanes 6, 7, 9, 10, 11 and 12 are repetition of GPN1, GPN2 and GPN3 purification respectively.

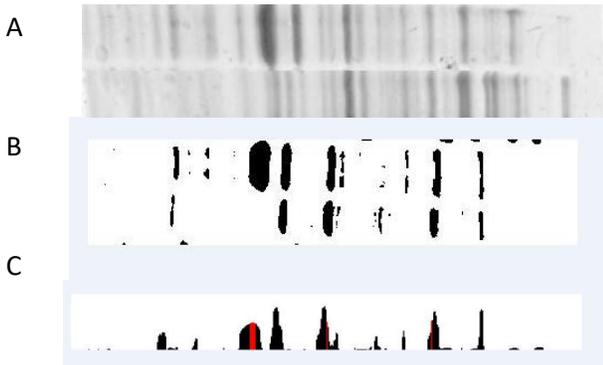


Figure 9. A) Image of gel SDS-PAGE, GPN2 expressed in top and total extract in bottom. B) Image A binarized with umbral modified, C) Histogram of B identifying the protein expressed indicated in red.

Dynamic Light Scattering studies shown that purification of the GPN protein family was effective, we can get the 80% of protein purity (Figure 10).

These studies shown that proteins have 11.164 nm (GPN1), 9.664 nm (GPN2) and 12.396 nm (GPN3). With this data we

can predict that these proteins are not completely globular, they have regions outside of the diameter of the protein.

We can get concentration of 3mg/ml of protein that was calculate using the Bradford analysis. The DLS studies also shown that we can get proteins homogeneous and mono disperses.

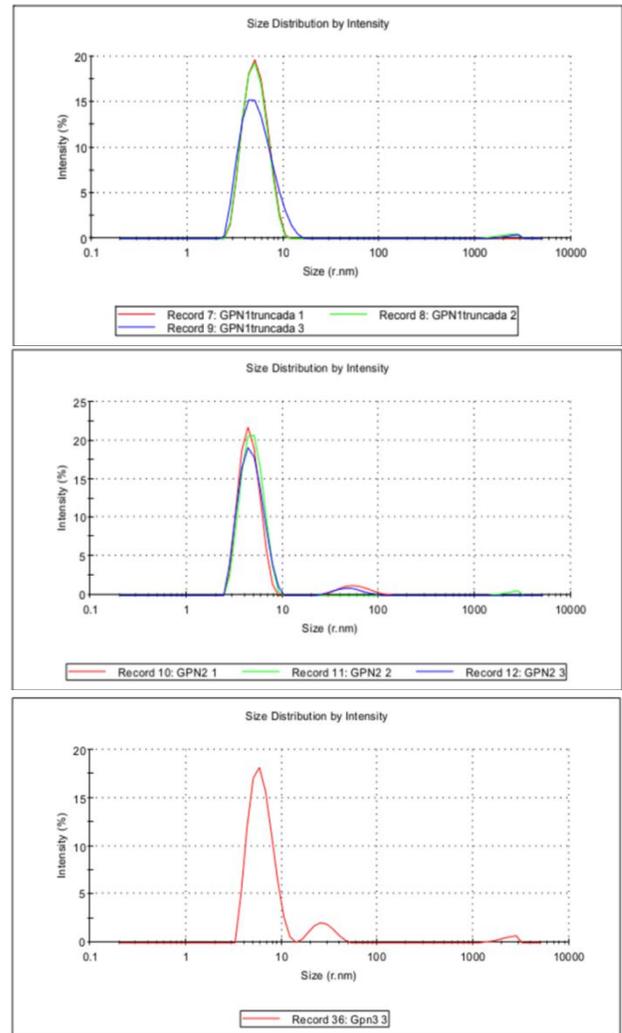


Figure 10. Dynamic Light Scattering of GPN1 (top), GPN2 (middle) and GPN3 (bottom), proteins purified

### 3. Conclusions

We studied the interaction between the proteins of the family GPN-Loop GTPases, this proteins are of unknown function and if they do not expressed then the cellular division stops.

Actually do not exist the structure known of this protein, for that we first take the sequence of the three proteins and search

the first prediction using (PS)<sup>2</sup>-v3 Protein Structure Prediction Server. This made a best similitude with 1yrbB of archea *Pyrococcus abyssi* (PA) with an error of  $6 \times 10^{-49}$  for GPN1,  $1 \times 10^{-59}$  for GPN2 and  $6 \times 10^{-60}$  for GPN3.

The data obtained with the server were analyzed with pymol software to get the cartoon structure. The GPN1 only could predict two beta-sheets of seven that had PA and only four of seven alpha-helix compared with the structure of GPN1. Meanwhile, GPN2 and GPN3 predicted five of seven beta-sheets and GPN2 had four alpha-helix but GPN3 had five of seven. The server could have a better prediction for GPN3.

The VISANT software could give us the information about the other protein involved or that interact with the GPN-Loop protein family and the most are of the RNA polimerase II biogenesis.

We expressed this proteins like recombinant proteins using *E. coli* like vector expression and were purified using immobilized metal affinity chromatography and were revealed with coomassie methodology. We design a software that comparing the histogram and can detected that protein expression was successful.

This purified proteins were analyzed in a dynamic ligh scattering and we could get the dimension of each one. The GPN1 has a 11,164 nm, the GPN2 9,664 nm and GPN3 12,396 nm of diameter.

The server cannot predict all the structure for the proteins, all had the Rossman type structure but the most part cannot be predicted.

This type of studies can be used to understand better the protein that we want to study and have a first representation of the proteins previous to crystallization studies.

#### 4. Bibliography

- [1] P. Cramer, S. Baumli, S. Benkert, F. Brueckner, C. Buchen, G. E. Damsma, S. Dengl, S. R. Geiger, A. J. Jasiak, A. Jaehari, S. Jennebach, T. Kamenski, H. Kettenberg, C. D. Kuhn, E. Lehmann, K. Leike, J. F. Sydow, A. Vannini, "Structure of eukaryotic RNA polymerases". *Annu Rev Biophys*, 2008. 37: p. 337-352.
- [2] J. Niesser, D. Kostrewa, W. Mühlbacher, P. Cramer, "Structure of GPN-Loop GTPase Npa3 and implications for RNA polymerase II assembly". *Molecular and Cellular Biology*, 2016 (36): p. 820-831.
- [3] D. Forget, P. Cloutier, R. Al-Khoury, A. Bouchard, M. Lavallée-Adam, et al., "The protein interaction network of the human transcription machinery reveals a role for the conserved GTPase RPAP4/hGPN1 and microtubule assembly in nuclear import and biogenesis of RNA polymerase II". *Mol. Cell. Proteomics.*, 2010 (12): p. 2827-39.
- [4] M. R. Calera, M. G. Araiza-Villanueva, C. A. Moreno-Aguilar, S. G. Peña-Gómez, F. Castellanos-Terán, et al., "Parcs/hGPN3 is required for the nuclear accumulation of RNA polymerase II". *Biochimica et Biophysica Acta*, 2011 (1813): p. 1708-16.
- [5] R. Sánchez-Olea, O. Barreto O, Q. Yang, X. Chi-jie, H. Zhu, et al., "Parcs Is a Dual Regulator of Cell Proliferation and Apaf-1 Function". *J. Biol. Chem.*, 2008 (283): p. 24400-405.
- [6] S. Boulon S, C. Verheggen, D. Molle, S. Boireau, M. Georgieva, K. Azzag, M. C. Robert, Y. Ahmad, H. Neel, A. I. Lamond, E. Bertrand, "HSP90 and its R2TP/Prefoldin-like cochaperone are involved in the cytoplasmic assembly of RNA polymerase II". *Mol. Cell.*, 2010 (6): p. 912-924.
- [7] J. Niesser, N., "Structure and function of the GPN-loop GTPase Npa3 and implications for RNA polymerase II biogenesis", in Fakultät für chemie und pharmazie der Ludwig-Maximilians-Universität München. 2015, Universität München: Germany.
- [8] B. Alonso, S. Meguellati, S. W. Chen, J. L. Pellequer, J. Armengaud, et al., "Eukaryotic hGPN-loop GTPases paralogs use a dimeric assembly reminiscent of archaeal hGPN". *Cell cycle*, 2013 (3): p. 463-472.
- [9] O. Matte-Tailliez, P. Forterre, "Mining archaeal proteomes for eukaryotic proteins with novel functions: the PACE case". *Trends Genet.*, 2000 (16): p. 533-36.
- [10] S' Lahmy, A. C. Schmit, G. Pelletier, M. E. Chaboute, M. Devi, "QQT proteins colocalize with microtubules and are essential for early embryo development in Arabidopsis". *The Plant Journal*, 2007 (50): p. 615-26.
- [11] G. Giaever, L. Ni, C. Connely, L. Riles, S. Véronneau, et al., "Functional profiling of the *Saccharomyces cerevisiae* genome". *Nature*, 2002 (418): p. 387-91.
- [12] K. Tarassov, C. R. Landry, S. Radinovic, Serna Molina MM, Shames I, et al., An in Vivo Map of the Yeast Protein Interactome. *Science*, 2008 (320): p. 1465-70.
- [13] S. Gras, B. Fernandez, P. Carpentier, F. Charrier-Savournin, S. Schmitt S, et al., "Structural insights into a new homodimeric self-activated GTPase family". *EMBO reports*, 2007 (8): p. 569-575.
- [14] B. Alonso, J. Armengaud, C. Godon, "A role for GPN-Loop GTPase yGPN1 in sister chromatid cohesion". *Cell Cycle*, 2011 (11): p. 1828-1837.
- [15] E. Moyroud, F. Ott, L. Yant, D. Posé, M. Monniaux, et al., "Prediction of regulatory interactions from genome sequences using a biophysical model for the Arabidopsis LEAFY transcription factor". *Plant Cell*, 2011 (23): p. 1293-1306.
- [16] S. Ben-Aroya, T. Kwok, K. A. O'Donnell, J. D. Boeke, P. Hieter, "Toward a comprehensive temperature-sensitive mutant repository of the essential genes of *Saccharomyces cerevisiae*". *Mol. Cell.*, 2008(30): p. 248-258.
- [17] C. Jeronimo, A. Bouchard, Q. Li, G. Chua, C. Poitras, et al., "Systematic Analysis of the Protein Interaction Network for the Human Transcription Machinery Reveals the Identity of the 7SK Capping Enzyme". *Mol. Cell.*, 2007 (27): p. 262-274.
- [18] S. W. Minaker, W. Ben-Aroya, P. Hieter, P. C. Stirling, "Biogenesis of RNA Polymerases II and III Requires the Conserved GPN Small GTPases in *Saccharomyces cerevisiae*". *Genetics*, 2013 (193): p. 853-864.
- [19] H. Tsun-Tsao, C. Chu-Huang, C. Chih-Sheng, L. Chi-Wen, C. Chih-Chieh, "(PS)2: protein structure prediction server versión 3,0". *Nucleic Acids Research*, 2015 (43): p. 338-342.
- [20] Z. lab, z. "What is FASTA format?" [cited 2018 23/july]; Available from: <https://zhanglab.cceb.med.umich.edu/FASTA/>.
- [21] C. C. Chen, J. M. Yang, "(PS)2: protein structure prediction server", in NAR. 2006. p. W152-W157.
- [22] C. C. Chen, J. M. Yang, "(PS)2-v2: template-based protein structure prediction server. *BMC Bioinformatics*", 2009 (10): p. 366.
- [23] S. Pirhadi, D. R. Koes, "Open Source molecular modeling". *J Mol Graph model*, 2016 (69): p. 127-143.
- [24] E. H. Baugh, B. D. Weitzner, J. J. Gray, "Real-Time PyMOL Visualization for Rosetta and PyRosetta", *PLoS ONE*, 2011 (8): p. e21931.
- [25] Z. Hu Z, J. Wu, C. DeLisi, "VisANT: an online visualization and analysis tool for biological interaction data", *BMC Bioinformatics*, 2004 (17): p. 1-8.
- [26] Z. Hu, C. DeLisi, "VisANT: an integrative framework for networks in systems biology", *Brief Bioinform*, 2008 (4): p. 317-325.

- [27] R. González-González, G. R. Cristóbal-Mondrago, S. G Peña-Gómez, G. M. Montero-Mora, S. Lara-González, A. Hernández-Arana, D. A. Fernández-Velasco, M. R. Calera, R. Sánchez-Olea, "Human Gpn1 purified from bacteria binds guanine nucleotides and hydrolyzes GTP as a protein dimer stabilized by its C-terminal tail". *Protein Expression and Purification*, 2017 (132): p. 85-96.
- [28] P. A. Hubbard, T. Labunska, "Crystal structure and mutagenesis of the metallochaperone MeaB: insight into the causes of methylmalonic aciduria". *J.Biol.Chem.*, 2007 (282): p. 31308-31316.

## **5. Biography**

J. Juárez is a researcher at Computer System Engineering in Universidad Politécnica Metropolitana de Puebla. He is interested in image analysis applied to biomedicine and biotechnology and bioinformatics.

M. R. Guevara-Villa is a researcher at Industrial Engineering in Universidad Politécnica de Puebla, she is working with separations techniques of substances and proteins of biological functions.

J. Newton is leader at Cornell Health in Cornell University and is responsible in Clinical Administrative Support Services.

# Clasificación de naranjas mediante algoritmos supervisados

F. Perez-Encina, G. Martínez-Tito, L. Gómez, Marco I. Ramirez-Sosa Moran, D. Martinez-Peon, M.A. Ochoa-Villegas\*

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Nuevo León, Depto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

\*autor de correspondencia: miguel.angel.ochoa@itnl.edu.mx

**Resumen**—El municipio de Montemorelos, N.L., es conocido por ser uno de los principales productores de naranja, sin embargo, no cuenta con procesos automatizados para la clasificación de su producto. Las empacadoras de la región son las encargadas de decidir si las naranjas se destinan para consumo de mesa o de jugo. Por esa razón es que el objetivo principal del presente trabajo se enfoca a una clasificación automática de las naranjas con ayuda de algoritmos de Inteligencia Artificial a un bajo costo y así con ello obtener una ventaja competitiva con respecto a otros productores nacionales. Con la propuesta de este trabajo se obtiene un porcentaje de reconocimiento superior al 90%.

**Palabras clave.** Naranja, Clasificación, Redes Neuronales, SVM, Visión artificial, Inteligencia Artificial.

## 1. Introducción

El estado de Nuevo León es famoso por ser uno de los principales estados dedicados a la industria y al ganado a nivel nacional, así como dedicarse al cultivo de cítricos, ya que aporta el 14% de la producción nacional. Montemorelos, General Terán, Cadereyta, Linares, Allende y Hualahuises son los municipios que participan en dicha actividad, los cuales se encuentran a cargo del Comité Estatal de Sanidad Vegetal, supervisando las acciones en relación a la sanidad de las huertas.

La naranja que se comercializa en el estado de Nuevo León en una primera instancia es destinada para consumo fresco en supermercados y en centrales de abasto de la zona metropolitana, vendiéndola a detallistas y directamente al consumidor. La siguiente instancia es el de la venta a las jugueras y empacadoras; los compradores adquieren la naranja cuya presentación no es relevante, pero la calidad del jugo debe ser alta, sin embargo, para las empacadoras se busca darle uniformidad a la fruta y buen color, de esta forma se requiere que la fruta sea grande y uniforme en tamaño [1].

La primera clasificación que se le da al fruto es en el campo de forma manual, de acuerdo al tamaño y aspecto; posteriormente, los dueños de las bodegas cuentan con maquinaria para separar la naranja por diferente tamaño, para clasificarla de acuerdo a su consumo. Las naranjas de mesa se caracterizan por tener tamaño grande, con piel fácil de pelar, así como, un color más anaranjado intenso, además de no tener semillas. Caso contrario a las que se destinan para jugo, teniendo un color más amarillo, con piel más fina, por lo tanto, son más difíciles de pelar y suelen tener más semillas que las anteriores [2].

En el estado se encuentran 10 empacadoras de naranja, las cuales realizan el proceso de lavado, pintado, cepillado y encerado, posteriormente se separan por tamaños definidos

como calibre, para depositarlas en cajas de cartón con capacidad de 18 a 20 kg., respetando los tamaños comerciales como se observa en la Tabla 1.

TABLA I. CALIBRE NARANJAS POR DIÁMETRO ECUATORIAL (mm)

Calibre	Diámetro ecuatorial (mm)	Clasificación
46	>85	Mesa
56	79-85	Mesa
72	74-78	Mesa
88	69-73	Jugo
113	64-66	Jugo
138	60-63	Jugo

En la actualidad los sistemas de visión artificial se emplean cada vez más en la industria agroalimentaria en procesos de inspecciones de calidad o clasificación, ya que permiten automatizar las prácticas manuales y estandarizan técnicas y eliminan costosas tareas humanas de inspección. La mayor ventaja es la consistencia en largos periodos de tiempo ya que la objetividad de la visión humana sufre de limitaciones en la percepción visual.

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) han sido principalmente usadas para la clasificación y reconocimiento de patrones, debido a su intención de emular la función de las redes neuronales biológicas, a las que se les atribuye el proceso de aprendizaje mediante ejemplos; la arquitectura más utilizada es la denominada perceptrón multicapa “backpropagation”, ya que se ha utilizado para clasificación y reconocimiento de patrones en frutas. En la literatura se menciona que han sido utilizadas para clasificar manzanas según el color [3], o para clasificar diferentes tipos de frutas según ciertas características extraídas de la imagen [4].

Las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM), también pueden emplearse como métodos alternativos para resolver problemas de clasificación y regresión, ganando terreno y reconocimiento [5]. Una SVM transforma los datos de entrada por medio de una función “kernel”, que emplea el producto escalar, a un espacio de características de mayor dimensión, donde es posible encontrar el hiperplano óptimo que separe las clases y maximice el margen entre ellas.

De igual forma los árboles de decisión son modelos de predicción que se utilizan en la Inteligencia Artificial, dada una base de datos se elaboran diagramas de construcciones lógicas, muy similares a los sistemas de predicción basados en reglas, que sirven para representar y categorizar una serie de

condiciones que ocurren de forma sucesiva para la resolución de un problema.

El objetivo del presente trabajo es el de implementar un clasificador de naranjas basado en algoritmos de Inteligencia Artificial en función al tamaño del diámetro ecuatorial como único parámetro de clasificación.

## 2. Fundamentos esenciales para el clasificador

Esta investigación cuenta con el análisis de 50 naranjas obtenidas de un supermercado, las cuales se fotografiaron sobre una superficie blanca bajo la presencia de luz natural. Tomando al menos 3 caras previamente marcadas, la medida a considerar para el análisis fue el diámetro ecuatorial.

La medición del diámetro ecuatorial se hizo de forma manual, como se puede observar en la Fig. 1 (a), así como digital, para corroborar las medidas obtenidas por el sistema desarrollado. Las fotos fueron tomadas con una cámara HD Webcam C525 Logitech.

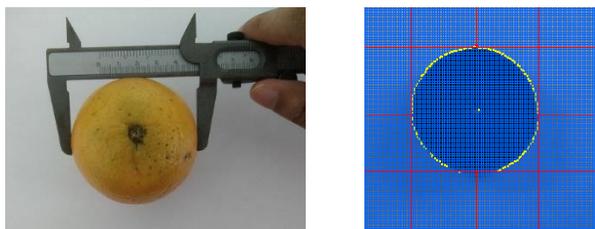


Fig. 1 Toma de medidas

Las imágenes utilizadas son a color, quiere decir que están compuestas de tres matrices monocromáticas con niveles de representación de 0 a 255 niveles, trabajando en sus 3 canales: rojo (R), verde (G) y azul (B). Como primer paso, en el análisis de imágenes generalmente es la segmentación de la imagen, este procedimiento subdivide la imagen en las partes que la constituyen u objetos. El modelo HSV es el más adecuado para el análisis de imágenes y su tratamiento, ya que al pasar de RGB a HSV permite hacer una discriminación entre la tonalidad de la imagen (HUE), cantidad de color puro o ausencia de blanco, (S-saturación) y el valor del color o brillo (V-value). Decidiendo trabajar con el canal H aplicando el umbral de Otsu, que permite discriminar los píxeles de una imagen en regiones. Finalmente, a la imagen obtenida se le suma la original, para posteriormente obtener su histograma, como puede verse en la Fig. 2.

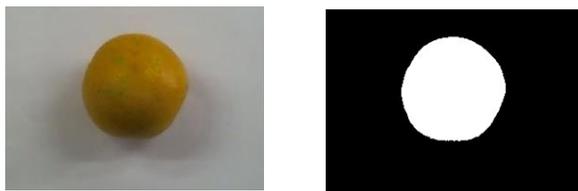


Fig. 2 Tratamiento digital de imágenes

### 2.1 Red Neuronal Backpropagation

La arquitectura de Perceptron multicapa se caracteriza porque tiene sus neuronas agrupadas en capas de diferentes niveles. Cada una de las capas está formada por un conjunto de neuronas y se distinguen tres tipos de capas diferentes: la capa de entrada, las capas ocultas y la capa de salida. Las neuronas de la capa de entrada no actúan como neuronas propiamente dichas, sino que se encargan únicamente de recibir las señales o patrones del exterior y propagar dichas señales a todas las neuronas de la siguiente capa. La última capa actúa como salida de la red, proporcionando al exterior la respuesta de la red para cada uno de los patrones de entrada. Las neuronas de las capas ocultas realizan un procesamiento no lineal de los patrones recibidos. Generalmente, todas las neuronas de una capa están conectadas a todas las neuronas de la siguiente capa. Se dice entonces que existe conectividad total o que la red está totalmente conectada [6][7].

Para este caso la función de activación de las neuronas es la función sigmoideal, y viene dada por la siguiente ecuación:

$$f_{sigm}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (1)$$

La capa de entrada consta de 2 neuronas: 1 neurona en la capa oculta y 2 en la salida. Se maneja una tasa de aprendizaje de 0.3 y 0.2, ambas con 500 iteraciones.

Este tipo de aprendizaje es supervisado, lo cual conlleva a establecer previamente que valores son los deseados para el conjunto de datos proporcionados en la capa de entrada.

### 2.2 Máquinas de Soporte Vectorial

Es una nueva técnica de clasificación y ha ido tomado mucha atención en años recientes [8], una SVM primero mapea los puntos de entrada a un espacio de características de una dimensión mayor y encuentra el hiperplano que los separe y maximice el margen entre las clases en este espacio como se muestra en la Fig. 2.

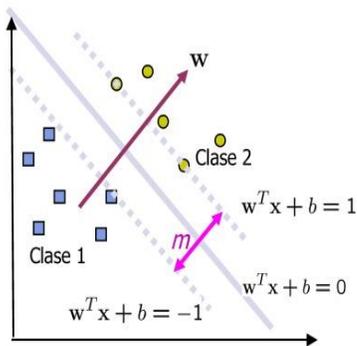


Fig. 3 Linealmente separable

Como se puede observar, se trata de un caso linealmente separable, cada punto de entrenamiento  $x_i \in \mathcal{R}^N$  pertenece a alguna de las dos clases y se le ha dado una etiqueta. Se define el par  $(w, b)$ , tal que se pueda separar el punto  $x_i$  de acuerdo a la siguiente función:

$$f(x_i) = \text{sign}(w \cdot z_i + b) = \begin{cases} 1 & y_i = 1 \\ -1 & y_i = -1 \end{cases} \quad (2)$$

Donde  $w \in \mathcal{Z}$  y  $b \in \mathcal{R}$ . De forma precisa, el conjunto  $S$  es linealmente separable, porque se puede encontrar un único hiperplano óptimo, para el cual, el margen de las proyecciones de los puntos de entrenamiento de dos diferentes clases es maximizado.

### 2.3 RandomTree

Es un árbol dibujado al azar de un juego de árboles posibles, en este contexto “al azar” significa que cada árbol en el juego de árboles tiene una posibilidad igual de ser probado, es decir que consiste en que la distribución de árboles es uniforme.

Primero se marcan los vértices  $n$  por número a través de  $\binom{n}{2}$  de una manera aleatoria para que cada vértice tenga la misma probabilidad (este vértice es la permutación aleatoria). Usando esta permutación, se comienza a construir un árbol sobre vértices de  $n$ : inicialmente, se tiene vértices de  $n$  y ninguna marca. En el paso  $k - th$  se intenta agregar el borde de  $k - th$  y ver si el gráfico resultante contiene un ciclo. Si es así, se salta el borde o línea de marca, además se agrega al gráfico y se repite para  $k + 1$ , durante este proceso el gráfico almacenará un bosque. De modo que, al contar con el atributo del tamaño del diámetro ecuatorial de la naranja, solo debe clasificar a que tipo corresponde dicha clasificación [9].

### 3. Experimentos y resultados

Se generó una base de datos de acuerdo a los rangos de cada calibre mencionados en la Tabla 1 [1], dando saltos de 0.01 entre cada nominal de cada calibre. Permitiendo tener una red neuronal más robusta, ya que al tratarse de un problema real se debían cubrir todos los posibles calibres, para que el margen de

error en la clasificación fuera lo mínimo posible. Los calibres de prueba son los que se obtuvieron con las 50 naranjas previamente medidas de manera manual y con el sistema desarrollado.

En la red neuronal artificial, se utiliza una tasa de aprendizaje de 0.2 y 0.3, ambas tasas de aprendizaje con 100, 200, 300, 400 y 500 iteraciones. En la Tabla 2 y Tabla 3, se pueden observar los resultados obtenidos en cuestión de porcentaje. La Figura 4 y Figura 5 muestran los gráficos obtenidos.

TABLA 2. TASA DE APRENDIZAJE 0.2

Iteraciones	Correcto (%)	Incorrecto (%)
100	87	13
200	88	12
300	91	9
400	88	12
500	88	12

TABLA 3. TASA DE APRENDIZAJE 0.3

Iteraciones	Correcto (%)	Incorrecto (%)
100	81	17
200	85	15
300	86	14
400	85	15
500	82	18

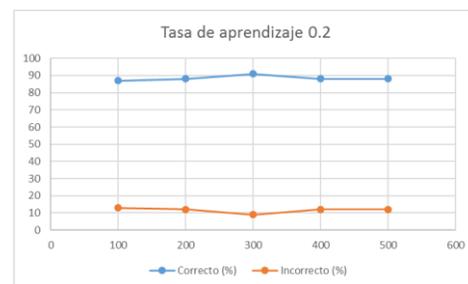


Fig. 4 Porcentajes tasa de aprendizaje 0.2

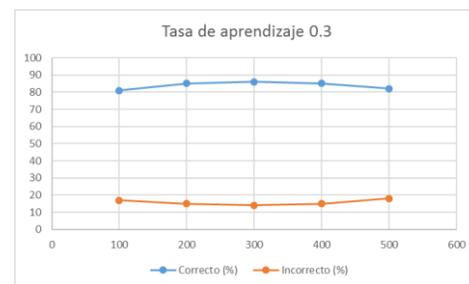


Fig. 5 Porcentajes tasa de aprendizaje 0.3

Sin embargo, es importante analizar la clasificación que se logra, se pueden observar los resultados en la Tabla 4 y Tabla 5.

TABLA 4. CLASIFICACIÓN CON TASA DE APRENDIZAJE 0.2

Iteraciones	Jugo	Mesa
100	2	3
200	1	4
300	0	4
400	0	5
500	0	5

TABLA 5. CLASIFICACIÓN CON TASA DE APRENDIZAJE 0.3

Iteraciones	Jugo	Mesa
100	0	7
200	0	6
300	0	6
400	0	6
500	0	6

En ambos casos, se lleva una mejor clasificación en la naranja de jugo, los errores se encuentran en la clasificación de mesa. El mejor resultado encontrado utilizando este algoritmo es con 300 iteraciones y tasa de aprendizaje de 0.2.

Para las máquinas de soporte vectorial, se utilizan los siguientes kernels, ya que son de los más utilizados y dado que se trata de un problema linealmente separable, son perfectos para este estudio.

TABLA 6. KERNELS

Kernel	Función
Lineal	$x_i^T x_j$
Logístico	$\logit(y) = \log(y/(1 - y))$

Haciendo uso nuevamente de los calibres entrenados y los de prueba, por medio de los kernels utilizados, se logran los resultados, mostrados en la Tabla 7, así como la clasificación encontrada en la Tabla 8.

TABLA 7. PORCENTAJES DE CLASIFICACIÓN

Kernel	Correcto (%)	Incorrecto (%)
Lineal	93	7
Logístico	90	10

TABLA 8. CLASIFICACIÓN CON TASA DE APRENDIZAJE 0.2

Kernel	Jugo	Mesa
Lineal	1	2
Logístico	2	2

En la Figura 6, se encuentra su respectivo gráfico.

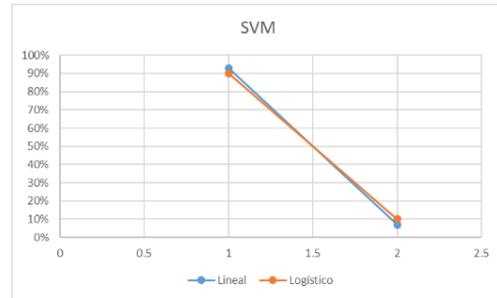


Fig. 6 Porcentajes de clasificación

Los árboles de decisión fue el algoritmo más sencillo en implementar, dado que solo tenía una regla de decisión. Tal como se puede observar en la Tabla 9.

	Correcto (%)	Incorrecto (%)
RandomTree	99.96	0.04
	Jugo	Mesa
RandomTree	1	0

#### 4. Conclusiones

Dada la naturaleza de la Tabla 1, donde se muestran los calibres se puede decir que se trata de un problema linealmente separable, del cual se obtienen resultados satisfactorios, sin embargo, las mediciones de las naranjas deberían utilizarse tanto en diámetro ecuatorial como polar. Se puede reafirmar el uso de las máquinas de soporte vectorial como un clasificador potente. Estos resultados son la primera etapa, posteriormente se buscará analizar los calibres de la naranja en las mismas huertas que se encuentran en Montemorelos, para que no recaiga la clasificación en la empacadoras. Así encontramos un área de oportunidad para que la tecnología una vez más se conecte con el sector de la citricultura.

#### 5. Referencias

- [1] Agronuevoleon.gob(2012) "Plan rector del Sistema productos cítricos" Recuperado de: [http://www.agronuevoleon.gob.mx/oeidrus/sistemas\\_producto/prtrigonl.pdf](http://www.agronuevoleon.gob.mx/oeidrus/sistemas_producto/prtrigonl.pdf)
- [2] Elcorteinglés(2015) "Cómo elegir las naranjas de zumo y las de mesa y no volver a confundirlas nunca más" Recuperado de: <https://www.elcorteingles.es/aptc/reportajes/como-elegir-las-naranjas-de-zumo-y-las-de-mesa-y-no-volver-a-confundirlas-nunca-mas/>
- [3] Ben-Hanan, U., Peleg, K., Gutman, P.O.:Classification of fruits by a Boltzmann perceptron neural network. Automatica, Vol. 28, No. 5, pp. 961-968 (1992)
- [4] Zhang, Y. Wang, S., Ji, G., Phillips, P.: Fruit classification using computer vision and feed-forward neural network. Journal of Food Engineering, 143, pp. 167-177 (2014)
- [5] Wernick M, et al. Machine Learning in Medical Imaging. Signal Processing Magazine, IEEE, vol. 27, pp. 25-38, 2010.
- [6] Galván, I., Isasí, P., Redes de neuronas, un enfoque práctico, Edit. Pearson Prentice Hall, pp. 45-69, 2003.
- [7] Rosenblatt, F. and Laboratory CA, The perceptron: a theory of statical separability in cognitive systems, Cornell Aeronautical Laboratory, 1958.
- [8] Riaño, O., Acosta, C., Leal, R. Classification of a satellite image using vector support machines to quantify pinus patula's area in a plantation,

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Volumen especial, p. 145, 2016.

- [9] Dimacs, “The random tree process”, disponible: [http://dimax.rutgers.edu/~alexak/tree\\_process.html](http://dimax.rutgers.edu/~alexak/tree_process.html), 2008.

## 5. Biografías

Francisco Javier Pérez. Estudiante de la carrera de ingeniería mecatrónica. Instituto tecnológico de Nuevo León. Sus áreas de interés son la inteligencia artificial y la visión computacional.

Gabriel Martínez Tito. Estudiante de la carrera de ingeniería mecatrónica. Instituto tecnológico de Nuevo León. Sus áreas de interés son la robótica y el control de procesos industriales automatizados.

Laura Elena Gómez Sánchez. Doctor en Computación con especialidad en Inteligencia Artificial, profesor asignatura del Instituto Tecnológico de Nuevo León. Áreas de interés son reconocimiento de patrones, redes neuronales, machine learning.

Dulce Martínez-Peon estudió Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Toluca. Realizó estudios de Maestría en Control Automático en CINVESTAV y el grado de Doctor en Física e Ingeniería Biomédica. Es miembro IEEE y revisora de la revista Biomedical Signal Processing and Control de Elsevier.

Marco Ivan Ramirez Sosa Moran obtuvo los grados de Ingeniero Electronico, Maestro y Doctor en Ciencias y en Ingeniería Eléctrica en los años 1994, 1997 y 1999, respectivamente. Es profesor investigador del Tecnológico Nacional de México desde 2011, miembro del comité editorial del International Journal of Automation Technology y Senior member del IEEE.

Miguel Ángel Ochoa-Villegas Ingeniero en Mecatrónica y Doctor en Tecnologías de la Información y Comunicaciones con especialidad en Sistemas Inteligentes por parte del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) Campus Monterrey. Algunas distinciones otorgadas incluyen: certificado ALPHA de alumno sobresaliente, concentración en logística internacional, Mención Honorífica y Mención Honorífica de Excelencia en sus estudios de licenciatura y posgrado respectivamente. En 2013 participó en una estancia de investigación doctoral para el ComputationalBiomedicineLab en la Universidad de Houston, Houston, Texas, con la finalidad de desarrollar algoritmos de preprocesamiento de imágenes para la supresión de iluminación variante en sistemas de reconocimiento Actualmente es profesor de tiempo completo de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Nuevo León.

# Seguimiento de un punto láser en un video

R. Romero<sup>1,a</sup>, J. Yalja<sup>2,b</sup>, A. Fernández<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias e Ingeniería en Computación  
Instituto Politécnico Nacional, ESCOM Ciudad de México

<sup>2</sup>Laboratorio de Robótica y Mecatrónica  
Instituto Politécnico Nacional, CIC

<sup>a</sup>rromero@ipn.mx, <sup>b</sup>yalja@ipn.mx, <sup>c</sup>afernandezv@ipn.mx

**Resumen**— Se programó un procedimiento para realizar el seguimiento de un punto generado por señalador láser para aplicarlo a diferentes proyectos. El método está basado en la demarcación de un área de interés; la obtención de un histograma y la desviación estándar por cada canal RGB. Una vez obtenido se usa la segmentación por color y operaciones morfológicas de apertura y cierre para mejorar la localización y eliminar ruido. Se enfoca el procesamiento en el seguimiento de una región de interés donde se encuentra localizado el punto láser y se obtienen los centros para dibujar la ruta. Los resultados obtenidos permiten implementar el procedimiento en diferentes proyectos tal como el seguimiento de robots, medición de distancias, etc.

*Palabras clave.* Procesamiento, video, webcam, segmentación, histograma, desviación standard, centroide.

## 1. Introducción

El uso del Láser en la actualidad es muy difundido. Las aplicaciones van desde la industria del entretenimiento, en la salud hasta aplicaciones bélicas [1].

Para la determinación de trayectorias de objetos en movimiento se emplea cámaras de video como sensor de entrada tal como lo realizan J. Catuche y Bacca en [2]. Las trayectorias de los objetos pueden ser curvas, líneas, etc. El procesamiento de video es útil en la robótica móvil debido a la información que puede ser extraída del entorno, así como de las actividades que desarrolla un objeto, por ejemplo un robot [3]. Por supuesto que una comunidad de robots puede llevar a cabo el proceso de seguimiento, si se usa un láser como punto a reconocer entre ellos. Así la visión artificial puede por su carácter no-intrusivo evitar posibles interferencias, sobre todo si se aplica a vehículos autónomos; donde las condiciones meteorológicas y de iluminación se vuelven un reto [4]; Sin embargo, el seguimiento de un láser no solo es útil en el ámbito de los robots y el computo; también puede ser de gran utilidad en CMMS (Coordinate Measuring Machines) con acentuación especial en los interferómetros [5]. En el campo de la medicina como en [6] puede adquirir importancia indispensable para la vida. En este artículo se realiza el seguimiento de un punto láser a partir de un video o directamente de los frames generados por una cámara web; lo que permite determinar la trayectoria seguida por el haz de luz.

## 2. Procedimiento empleado

Para el seguimiento del láser se llevó a cabo el procedimiento mostrado en la figura 1. En el sistema se empleó una cámara Logitech HD Pro Webcam C920 y Matlab como herramienta de diseño y programación.

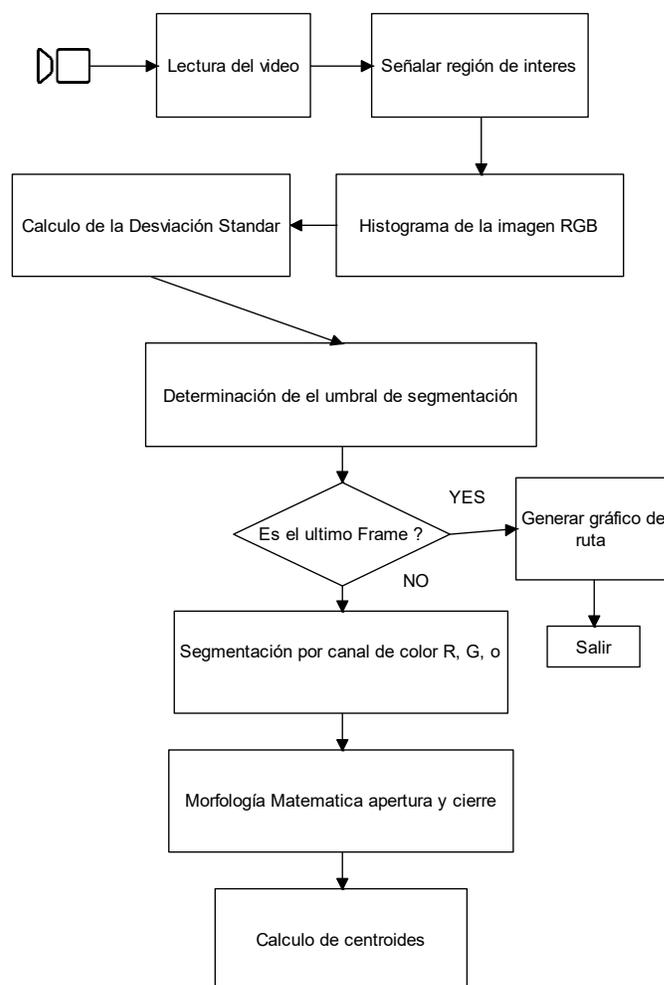


Fig. 1. Descripción de procedimiento empleado

### A. Lectura de video

La lectura de video se puede hacer directamente de una cámara web o de archivos previamente grabados.

### B. Región de Interés

Es necesario marcar una región de interés (ROI) para mejorar en procedimiento empleado. En Matlab el ROI es una parte de una imagen sobre la cual se quiere trabajar. Para definir una región de interés se usa una máscara o imagen binaria, de igual tamaño que la imagen que se desea procesar. Los píxeles que definen el ROI se establecen en 1 y los demás en 0. Las regiones pueden ser polígonos que abarcan píxeles contiguos.

### C. Histograma de la Imagen RGB

El histograma es una distribución tanto cualitativa como cuantitativa que describe la frecuencia con la que se presentan los valores de intensidad (píxeles) de la imagen. Es un gráfico de distribución de valores de píxeles de una imagen (niveles de color por canal) o de una porción de la misma [7][8]. Ver figura 2. La expresión formal que la define es:

$$h(i) = \text{card}^2\{(u,v) | (u,v) = i\} \quad (1)$$

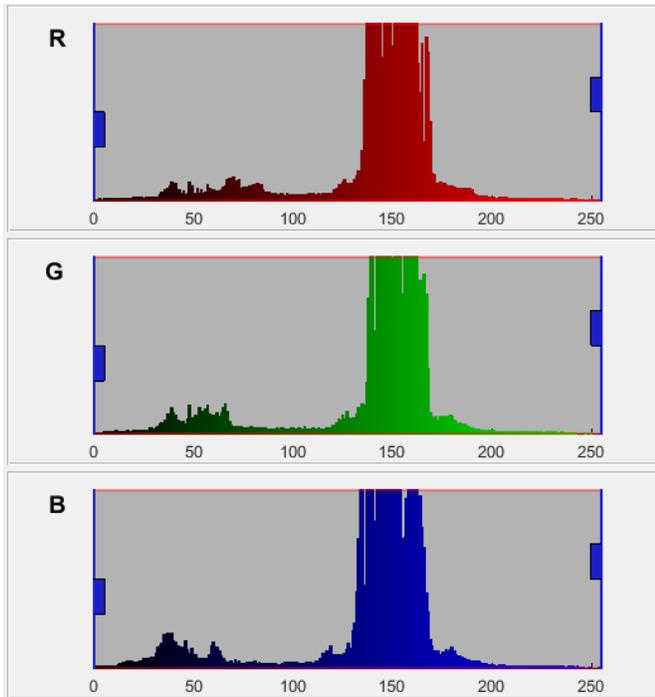


Figura 2. Histograma de imagen original

### D. Calculo de la división estándar

La desviación estándar, también conocida como desviación típica, es una medida de dispersión usada en estadística que nos dice cuánto tienden a alejarse los valores puntuales del promedio en una distribución. Se suele representar con la letra sigma,  $\sigma$ .

La desviación estándar de un conjunto de datos es una medida de cuánto se desvían los datos de su media. Esta medida es más estable que el recorrido y toma en consideración el valor de cada dato [8]. Ver ecuación (2).

$$\sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n}} \quad (2)$$

Con el dato obtenido de la desviación estándar se determinan los umbrales para la segmentación de la imagen por cada canal; los cuales se van disminuyendo interactivamente hasta que solo quede el elemento generado por el punto láser.

### E. Segmentación

La segmentación que emplea un umbral es una forma especial de cuantificación donde los píxeles de la imagen son divididos en dos clases. Así se puede encontrar su función como en la ecuación (3). Donde  $p_o$  y  $p_i$  son los valores que asume la imagen y  $p_{th}$  el umbral. La segmentación se realiza para cada frame que forma el video o por cada imagen que se obtiene de la webcam en tiempo real. Así se obtienen la segmentación como resultado de la aplicación de los umbrales por cada canal. La figura 4 presenta como van estrechándose los límites para la segmentación en una imagen [9].

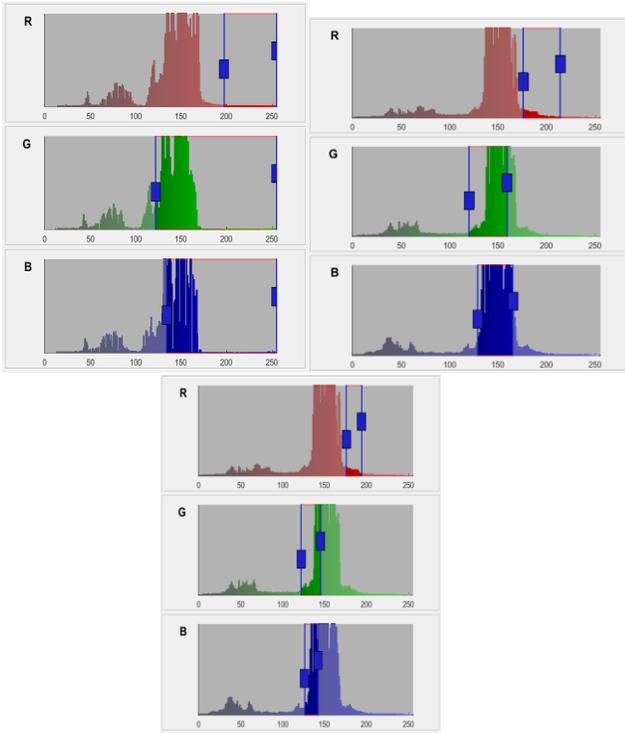


Figura 3. Secuencia de Histogramas para determinar el umbral

$$f_{th} = \begin{cases} p_o & \text{si } p < p_{th} \\ p_i & \text{si } p \geq p_{th} \end{cases} \quad (3)$$

#### F. Morfología matemática Apertura y Cierre

Dilatación binaria. La dilatación ayuda a eliminar ruido. Se tiene una imagen A, y un elemento B, la dilatación se define con la ecuación (4) [10] [11]:

$$A \oplus B = \{d \in E^2: d = a + b \text{ para cada } a \in A \text{ y } b \in B\} \quad (4)$$

Erosión Binaria. La erosión de la imagen A con el elemento estructural B, combina dos conjuntos utilizando la sustracción de vectores. Ver ecuación (5):

$$A \ominus B = \{d \in E^2: d + b \in X \text{ para cada } b \in B\} \quad (5)$$

#### G. Calculo de centroides

Un centroide es el punto ubicado en el centro de masa de un área. El método de cálculo del centroide consiste en tomar la distancia media en cada dirección y expresarla como proporción de la superficie total de una forma. Cada punto que

se registra como el cambio en el tamaño de la forma se llama momento [12]. De tal manera que formas complicadas necesitan un mayor número de momentos para encontrar el centroide; La frecuencia de medición se puede realizar con más precisión y rapidez por los ordenadores que por los seres humanos. Por lo tanto el centroide  $\bar{x} = (\bar{x}, \bar{y})$  de un objeto binario es el punto medio aritmético de las coordenadas en la dirección y y x, las cuales se calculan mediante la ecuación (6) y (7):

$$\bar{X} = \frac{1}{Area(0)} \sum_{(x,y) \in 0} x \quad (6)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{Area(0)} \sum_{(x,y) \in 0} y \quad (7)$$

### 3. Resultados

Se realizaron varias pruebas con diferentes umbrales para la segmentación, logrando aislar completamente el punto láser. En la figura 4 se muestran los umbrales para cada canal RGB y el resultado obtenido donde se aísla completamente el punto láser.

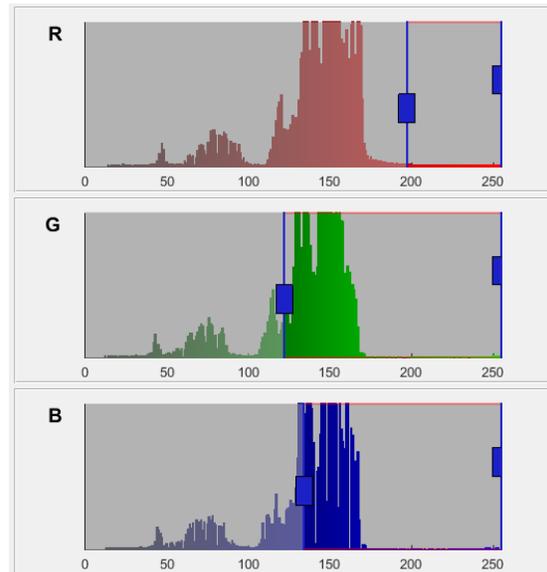


Fig. 4. Umbrales en histograma el resultado de la segmentación.

No siempre se logra aislar únicamente el punto láser; sin embargo después de aplicar las operaciones de morfología matemática de cierre y apertura se consigue aislar dicho objetivo. Ver figura 5.

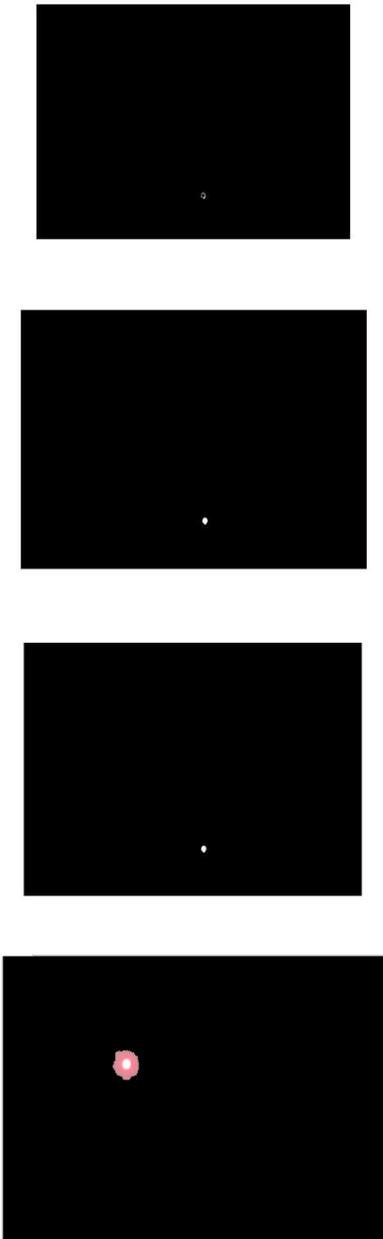


Fig. 5 Resultado de segmentar y aplicar las operaciones morfológicas.

El seguimiento se realizó sin mayores contratiempos gracias en gran medida al empleo de la ROI de matlab (Región de Interés). Con un máximo de 30 frames por segundo. Las figuras 4 y 5 muestran las trayectorias seguidas por los puntos láser en dos videos diferentes.

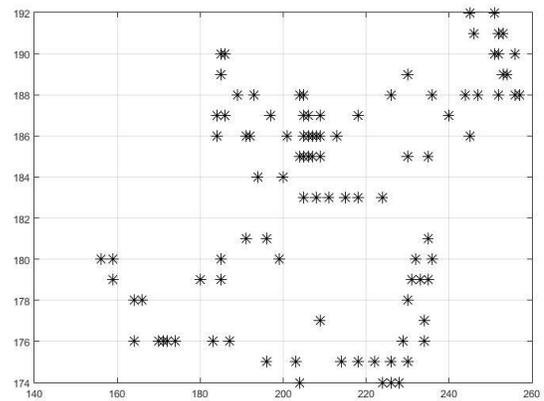


Fig. 6. Ruta seguida por punto láser con oscilaciones

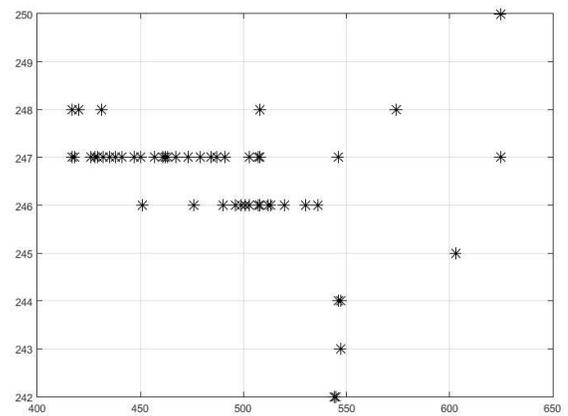


Fig. 7. Ruta seguida por punto láser un movimiento más lineal.

En ambas figuras 6 y 7 la ruta obtenida considera videos donde existen objetos rojos similares al punto láser. Como el mostrada en el escenario de la figura 8.



Figura 8. Video con objetos en rojo similar al punto láser.

#### 4. Conclusiones

Se implementó una técnica útil para el seguimiento de un punto generador por un apuntador láser logrado su seguimiento a 30 frames por segundo. La técnica se puede emplear en robots seguidores o en la automatización de autos. El tiempo de procesamiento depende del tamaño del video; Sin embargo, cuando se procesan frames directos de la cámara web se puede procesar el punto láser en tiempo real. El uso de las técnicas de procesamiento digital de imágenes empleadas permite el seguimiento aun con objetos con similar color. Las características del láser evitan que la luz afecte su localización. Debemos considerar que cuando se trata de rayos de luz la combinación de los colores da el color blanco mientras que si se trata de pigmentos el color resultante es el negro. Como se observa en la segmentación de las figuras 4 y 5 en realidad el punto láser obtenido es de color blanco con una areola roja.

#### 5. Trabajo a futuro

Se tiene planteado aplicar el sistema de seguimiento de punto láser en la medición de distancia a objetos en tiempo real tomadas directamente de una cámara web; de tal manera, que se pueda usar en robots o vehículos autónomos o también para generar planos de objetos o de arquitecturas.

#### 5. Reconocimiento

Al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para el desarrollo del proyecto.

#### 5. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden en que fueron referidas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la forma deseada de incluirlas.

- [1] Restrepo, Francisco Gustavo. "Algunas consideraciones sobre las tecnologías de punta y la innovación tecnológica." *Revista Facultad de Derecho y Ciencias Políticas* 78 (1987): 97-107.
- [2] J. Catuche, J. Sterling and B. Bacca Cortes, "Seguimiento de trayectorias y objetivos en tierra usando un dirigible y visión artificial," *Seguimiento De Trayectorias y Objetivos En Tierra Usando Un Dirigible y Visión Artificial*, 2009.
- [3] H. Q. Pardo, J. L. C. Rolle and O. F. Romero, "Aplicación de un robot comercial de bajo coste en tareas de seguimiento de objetos," *DYNA (Colombia)*, vol. 79, (175), pp. 24-33, 2012.
- [4] J. Arróspide and L. Salgado, "Video based vehicle detection and tracking for driver assistance systems: Detección y seguimiento de vehículos basado en análisis de vídeo para sistemas de ayuda a la conducción," *Securitas Vialis*, vol. 7, (1), pp. 41-49, 2015.
- [5] K. Wendt, M. Franke and F. Härtig, "Measuring large 3D structures using four portable tracking laser interferometers," *Measurement*, vol. 45, (10), pp. 2339-2345, 2012
- [6] J. F. Briceño Castellanos, D. A. Gaviria Beitia and Y. A. Carranza Rodríguez, "Láser en odontología: fundamentos físicos y biológicos / Laser in Dentistry: Physical and Biological Foundations," *Universitas Odontologica*, vol. 35, (75), 2017.
- [7] Gianfranco Passariello, Fernando Mora, "Imágenes Medicas", Ediciones de la Universidad Simón Bolívar, ISBN 980-237-092-4, 1995.
- [8] Erick Cuevas, Daniel Zaldivar, Marco Pérez, "Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink", Alfaomega Ra-Ma, ISBN: 978-607-030-6, 2010.
- [9] C. R. Jung, "Unsupervised multiscale segmentation of color images," *Pattern Recognition Letters*, vol. 28, (4), pp. 523-533, 2007.
- [10] R. R. Herrera, S. De La O Torres and R. A. O. Martínez, "Recognition of emotions through HOG," *2018 XX Congreso Mexicano de Robótica (COMRob)*, Ensenada, B.C., Mexico, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/COMROB.2018.8689411
- [11] Jose F. Pertusa Grau "Técnicas de análisis de imágenes", PVU, ISBN: 978-84-370, 2010
- [12] López-Urías, Luis A., and Luis F. Villavicencio-Velázquez. "Image Processing Framework for an Embedded System." (2017).

# Generador de números pseudoaleatorios con registros de corrimiento de retroalimentación lineal utilizando la metodología de diseño de codificador BCH implementado en una tarjeta FPGA

L. A. Hernández<sup>1,a</sup>, V. Basurtos<sup>1,b</sup>, X. Cabrera<sup>1,c</sup>, F. A. Serrano<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica

<sup>a</sup> alonsohernandezipn@gmail.com, <sup>b</sup> vivibasurtor@gmail.com, <sup>c</sup> xcabrerarivas@gmail.com, <sup>d</sup> univesime@hotmail.com

**Resumen**—Este artículo describe el diseño e implementación de un generador de números pseudoaleatorios mediante registros de corrimiento de retroalimentación lineal (LFSR) utilizando la metodología de diseño de codificadores tipo Bose-Chaudhuri-Hocquenghem (BCH). La construcción del generador de números pseudoaleatorios se basa en un polinomio generador  $g(x)$  mediante el cual podemos realizar el diagrama a bloques del circuito. El diseño del generador de números pseudoaleatorios se describe en VHDL empleando el software de Xilinx SI y se simula en circuito eléctrico usando Multisim.

**Palabras clave.** Generador de números pseudoaleatorios, Código BCH, Registros de corrimiento de retroalimentación lineal.

## 1. Introducción

Los mecanismos de generación de números aleatorios que se utilizan en la mayoría de los sistemas informáticos son en realidad procesos pseudoaleatorios. Los ordenadores necesitan números aleatorios para realizar todo tipo de tareas: simulaciones, juegos, criptografía, arte, etc. La forma de generarlos es totalmente matemática, lo cual es un problema más que una ventaja ya que al cabo de un tiempo lo que parece aleatorio no es tan aleatorio. Se puede utilizar una combinación con procesos físicos más o menos aleatorios (por ejemplo, los movimientos de un mouse sobre una mesa), pero haciendo uso de las matemáticas puras, lo mejor a lo que se puede obtener son números pseudoaleatorios. Éstos son bastantes cercanos al azar, pero en cierto modo también limitados en cuanto a su aleatoriedad. Por otra parte, se pueden usar distribuciones de probabilidad para generar números aleatorios. Cuando no se especifica alguna distribución, se utiliza la distribución uniforme continua en el intervalo cero a uno.

Los números pseudoaleatorios se generan de manera secuencial con un algoritmo determinístico, formalmente se definen por:

- Función de inicialización. Se recibe un número o valor inicial (semilla) y pone al generador en su estado inicial.
- Función de transición. Transforma el estado del generador a otro estado.

- Función de salida. Los estados producen un valor de salida en forma de bits (0 ó 1) y puede ser transformado a número decimal.

De manera general una sucesión o secuencia de bits pseudoaleatorios se puede obtener definiendo una semilla, después llamando repetidamente la función de transición y al final la función de salida que mostrará el valor en binario u otra base [1].

## 2. Generador de números pseudoaleatorios con LFSR

La mayoría de los algoritmos de generadores de números pseudoaleatorios producen sucesiones o secuencias que se repiten después de un largo periodo de tiempo. Las clases más comunes de estos algoritmos son generadores lineales, generadores Fibonacci demorados, registros de desplazamiento con retroalimentación lineal y retroalimentación generalizada.

Los registros de corrimiento de retroalimentación lineal (Linear feedback shift register - LFSR) han sido utilizados en aplicaciones dentro del área de la teoría de la codificación, ejemplo de ello se puede encontrar en la corrección de errores, encriptación, seguridad en comunicación inalámbrica, entre otras. Por otro lado, los circuitos LFSR son registros de desplazamientos cuyo bit de entrada es una función lineal de su estado anterior, la figura 1 muestra su diagrama a bloques de dicha estructura.

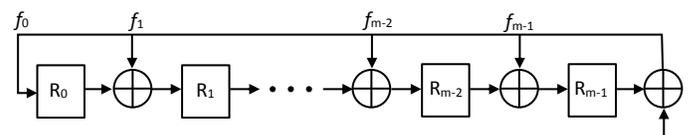


Figura 1. Estructura general de un circuito con registros de corrimiento de retroalimentación lineal (LFSR)

La secuencia binaria de un LFSR se puede representar en forma matemática como un polinomio en base 2, esto significa que los coeficientes del polinomio deben ser 1's o 0's. Este polinomio debe ser primo y primitivo para que la secuencia de números no se repita dentro de la máxima longitud o periodo

que puede tener. La operación lineal de suma utilizada en el polinomio es del tipo or exclusivo (XOR) [2].

Un LFSR es comúnmente un conjunto de registros de corrimiento (flip-flop's) cuyo bit es modificado por la compuerta XOR, así como por los valores de los registros de desplazamiento que están en función del polinomio generador. Su valor inicial se denomina semilla y debido a que su funcionamiento es determinista, el flujo de valores producidos por el registro está completamente determinado por su estado actual (o anterior). Dado que el registro tiene un número finito de estados posibles, eventualmente debe entrar en un ciclo de repetición. Sin embargo, si el ciclo o periodo de repetición es muy grande se puede considerar como un sistema no determinista [3].

En resumen, un LFSR descrito por polinomio generador  $g(x)$  (función de realimentación) correctamente elegido, puede producir una secuencia de bits con un periodo muy largo que hace que parezca tener una secuencia aleatoria.

### 3. Diseño de generador mediante metodología BCH

Una de las formas para el diseño de un generador de secuencias pseudoaleatorias es utilizando un LFSR. Éstos se basan en operaciones con polinomios y la teoría de los Campos de Galois [4], el cual lleva el nombre del matemático francés Évariste Galois (1811-1832), es decir, se puede especificar por su polinomio generador  $g(x)$ , el cual es un polinomio que se obtiene de la multiplicación de los polinomios mínimos  $m(x)$ , los cuales a su vez se generan de un polinomio base llamado primitivo  $p(x)$ . El cual es un polinomio irreducible en base dos, es decir es un polinomio primo (de manera similar a los números primos en los números enteros).

El funcionamiento de un LFSR se basa en las operaciones módulo 2 (xor) y elementos de almacenamiento (flip flop's) dentro de un campo finito. Para el diseño del generador de números pseudoaleatorios a partir de LFSR podemos seguir los pasos que se utilizan en el diseño de codificadores del tipo BCH, estos son:

1. Seleccionar y calcular el orden del polinomio primitivo  $p(x)$ .
2. Construir el campo de Galois a partir del polinomio primitivo.
3. Calcular los polinomios mínimos  $m(x)$ .
4. Determinar el polinomio generador  $g(x)$  a partir de los mínimos.
5. Obtener el diagrama a bloques.

Se inicia determinando el valor de "m", el cual determina el grado del polinomio primitivo y posteriormente se selecciona

el polinomio primitivo de dicho grado para generar el campo de Galois.

Para saber si el polinomio es primitivo se efectúa la división del polinomio entre la unidad base del polinomio, esto se realizará encontrando todas las combinaciones posibles de polinomios de grado "m" y posteriormente se procede a comprobar si el polinomio resulta ser primitivo [5]. Es decir, se realiza la división de cada polinomio entre  $x$  y  $x+1$ .

Tomando  $p(x) = x^5 + x^2 + 1$  se comprueba que es un polinomio primitivo, ya que el residuo de estas divisiones es "1". Posteriormente se construye el campo de Galois, que será de ayuda para poder realizar las correspondientes simplificaciones y con ello determinar todos los polinomios mínimos no repetidos a ocupar [6].

El cálculo de estos se hace mediante la siguiente expresión:

$$m_i(x) = \prod_{r=0}^{m-1} (x + \alpha^{2^r i}), \quad i = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Realizando las operaciones se obtienen los valores de los polinomios mínimos los cuales de acuerdo con el grado del polinomio primitivos se obtienen cuatro polinomios mínimos diferentes o no repetidos [7].

$$m_1(x) = x^5 + x^2 + 1 \quad (2)$$

$$m_3(x) = x^5 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (3)$$

$$m_5(x) = x^5 + x^4 + x^2 + x + 1 \quad (4)$$

$$m_7(x) = x^5 + x^3 + x^2 + x + 1 \quad (5)$$

El polinomio generador  $g(x)$  se obtiene de la multiplicación de los polinomios mínimos no repetidos (ecuaciones 2,3,4 y 5). El polinomio generador después de la multiplicación es:

$$g(x) = x^{20} + x^{18} + x^{17} + x^{13} + x^{10} + x^9 + \dots + x^7 + x^6 + x^4 + x^2 + 1 \quad (6)$$

El diagrama a bloques correspondiente al polinomio generador obtenido (ecuación 6), se muestra de manera general en la figura 3.

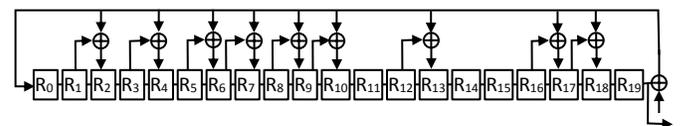


Figura 3. Diagrama a bloques de generador de números pseudoaleatorios para el polinomio  $g(x)$

#### 4. Pruebas y resultados

Se diseñó un generador de números pseudoaleatorios a partir del diagrama a bloques (figura 3), el cual se obtuvo utilizando el polinomio generador (ecuación 6). Este diagrama a bloques se implementó en la tarjeta FPGA Altera Cyclone IV en VHDL[8].

La Tabla 1 muestra la secuencia numérica de cada uno de los estados de acuerdo con el valor de una semilla ingresada. Esto se presenta para comparar el resultado teórico con las simulaciones realizadas a partir de la figura 3. Para ello se ingresa el valor 111100 en binario, el cual se está utilizando como ejemplo para el generador de números pseudoaleatorios. Este proceso de generar la secuencia numérica es obtenido mediante los flip flop's tipo D, es decir, al ingresar el valor por el primer flip flop se ira recorriendo de forma similar como en el caso de registros de corrimiento y al llegar al registro que tiene la compuerta xor, realizara dicha operación modificando los estados a cierto valor en binario.

TABLA I. SECUENCIA NUMÉRICA A PARTIR DE UNA SEMILLA INGRESADA EN EL GENERADOR DE NÚMEROS PSEUDOALEATORIOS.

Semilla	Estado
Estado inicial	000000000000000000
1	10100011010001000110
1	11110011111001100111
1	11110010111001100101
1	01110001011100100010
0	00110000101110000001
0	10110011000110000110

El diagrama a bloques de la figura 3 se implementó en la herramienta NI Multisim. En el circuito se tiene un interruptor (switch), el cual permite ingresar los valores de cero y uno a la entrada de este. Estos valores de entrada representan la semilla que, mediante el circuito generador, proporcionará un estado final que representará un número pseudoaleatorio, es decir la secuencia numérica se genera en función de la semilla ingresada.

La implementación de la figura 3 en NI Multisim nos ayudó para la comprobación del correcto funcionamiento de la descripción VHDL del generador de números pseudoaleatorios. Como ejemplo se ingresa el valor en binario 111100 (semilla) que generará el valor ó estado final 10110011000110000110 el cual es el mismo resultado que la simulación en VHDL.

Se comprueba el correcto funcionamiento del diagrama a bloques y circuito (Figura 3) utilizando el mismo valor de entrada (semilla) y generando la correspondiente secuencia

numérica, la cual se visualiza en la simulación con VHDL Test Bench de Xilinx ISE (Figura 4).

La simulación de la figura 4 muestra las gráficas de la entrada, el reloj y las salidas de los flip flop's en la cual podemos observar los diferentes estados de la secuencia numérica de acuerdo con los valores de entrada.



Figura 4. Simulación del generador de números pseudoaleatorios en VHDL Test Bench de Xilinx ISE.

#### 3. Conclusiones

En este trabajo de investigación se realizó el diseño de un generador de números pseudoaleatorios siguiendo los pasos para un codificador BCH. Es decir, utilizando la teoría de los campos de Galois se obtuvo el polinomio generador que representa el proceso para la generación de la secuencia numérica. De manera particular, se consideró un polinomio de grado veinte (el cual genera más de mil secuencias distintas), debido a que solamente se consideraron las principales salidas con las que cuenta la tarjeta de FPGA y con ello poderlo observar en forma binaria con leds. Sin embargo, es posible hacer el diseño para un grado mayor y con ello tener una longitud más grande que permita una secuencia de mayor tamaño. La tabla muestra el estado final para un valor inicial (semilla), el cual se pudo observar en los resultados obtenidos de la simulación y en la implementación con la tarjeta FPGA.

Este circuito, mediante las secuencias pseudoaleatorias puede ser utilizado en la generación de números de seguridad para tarjetas bancarias o en la verificación de códigos instantáneos. Su aplicación es de gran interés ya que también puede utilizarse en el área de la criptografía; por ejemplo, en imágenes o videos para poder ocultar cierta información mediante una llave pública o privada la cual puede ser generada a través de métodos como nuestro generador de números pseudoaleatorios. Los datos pueden ocultarse en los pixeles de la imagen mediante técnicas criptográficas y agregándole seguridad mediante secuencias pseudoaleatorias.

Para ser aplicable lo que debemos hacer es modificar el valor de la semilla, ya que con ella se generara una secuencia que no se repite en ningún número durante un periodo muy largo que para nuestro caso es de  $2^{20}$ , es decir se tienen 1048575 secuencia numérica diferentes. Este diseño puede ampliarse a tener una longitud mucho mayor y con ello que sea más difícil de poder encontrar el valor correspondiente de la clave y de esta manera poder mantener oculta la información en una imagen o información encriptada.

Se agradece el apoyo brindado a través del proyecto de investigación SIP-20190153

#### 4. Referencias

- [1] M. G. Kendall and B. B. Smith, Tables of random sampling numbers (No. 24), University Press, 1939.
- [2] S. Saravanan M. Lavanya R. Vijay and R. Kumar, «Design and Analysis of Linear Feedback Shift Register Based on Various Tap Connections» SciVerse ScienceDirect, vol. 38, pp. 640-646, 2012.
- [3] S. Miller and D. Childers, Probability and random processes: With applications to signal processing and communications, Academic Press, 2012.
- [4] E. Artin, Galois theory: lectures delivered at the University of Notre Dame, Edwards Brothers, Incorporated, 1994.
- [5] S. Bilan, Formation Methods, Models, and Hardware Implementation of Pseudorandom Number Generators: Emerging Research and Opportunities, Estados Unidos de America: IGI Global, 2018.
- [6] M. G. Kendall and B. B. Smith, Tables of random sampling numbers (No. 24), University Press, 1939.
- [7] P. J. Martínez, Extensiones de cuerpos. Teoría de Galois, Departamento de algebra. Universidad de Granada, 2017
- [8] C. S. Ruiz, Codificador RS(n,k) basado en LFCS: caso de estudio RS(7,3), Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2012..

#### 5. Biografías

Alonso Hernández nació en Ciudad de México, México en 1992. Actualmente está cursando 8° semestre de la Licenciatura en Ingeniería en Computación en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) ubicado en la Ciudad de México. Su interés de investigación son comunicaciones digitales aplicando programación en circuitería.

Viviana Basurto Ríos nació en Tula de Allende Hidalgo, en 1997. Actualmente está cursando 9° semestre de la carrera de Ingeniería en comunicaciones y electrónica en el Instituto

Politécnico Nacional (IPN), Ciudad de México. Su interés de son las comunicaciones, la electrónica y programación.

Xochitl Cabrera Rivas nació en el Estado de México en 1982. Recibió el grado de ingeniero en comunicaciones y electrónica egresada de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) Unidad Culhuacan en el año 2006. Otuvo el grado de maestra en Ciencias de Ingeniería de Microelectrónica en 2011, actualmente inscrita en el programa de Doctorado en comunicaciones y Electrónica de la sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME.

Fernando Adan Serrano Orozco nació en la Ciudad de México en 1981. Recibió el grado de ingeniero en comunicaciones y electrónica (2004), la maestría en ciencias de ingeniería en microelectrónica (2008) y el doctorado en comunicaciones y electrónica (2013) en el Instituto Politécnico Nacional (IPN), México. Actualmente trabaja como profesor investigador en el departamento de comunicaciones y electrónica de la ESIME Culhuacan del IPN. Su área de interés es en procesamiento digital de señales, teoría de la codificación y computo cuántico.

# Segmentación Eficaz y Eficiente de Imágenes del Cerebro Humano mediante el Modelo Neuronal de Intersección Cortical

J.L. SOTO-PIÑA, M. MEJÍA-LAVALLE, K.S. AGUILAR-DOMINGUEZ, J. RUIZ, G. REYES

*Tecnológico Nacional de México/CENIDET*  
{jose.soto18ca, mlavalle, kevin.aguilar17ca, joser, greyes}@cenidet.edu.mx

**Resumen**— El modelo de Red Neuronal Pulso-Acoplada inspirado en estudios de la corteza visual de mamíferos, ha mostrado una adaptación natural para segmentación de imágenes debido a su naturaleza pulsante, lo que lo acerca más al modelo neuronal biológico. En un mundo donde la mayoría de las técnicas para segmentar y/o detectar bordes utilizan operadores locales sustentados en aproximaciones discretas de la primera y segunda derivada de los niveles de gris de la imagen, se propone el modelo ICM para dar solución al problema de segmentación de imágenes. En este trabajo se experimenta con la Red Neuronal de Intersección Cortical ICM (una de las variantes de las Redes Neuronales Pulso-Acopladas PCNN), como una alternativa para la segmentación de imágenes del cerebro humano, con utilización de las métricas del Contraste del Nivel de Gris y de la Entropía para la evaluación de la segmentación, y se hizo una comparativa con la técnica clásica Canny, contra la cual la ICM fue mejor en un 30%.

*Palabras clave.* Segmentación de imágenes, Redes Neuronales Pulso-Acopladas, Modelo de Intersección Cortical, Canny.

## 1. Introducción

En este trabajo se emplea la Red Neuronal de Intersección Cortical ICM, como un método alternativo para dar solución al problema de segmentación de imágenes. Su procesamiento paralelo, y debido a que es un paradigma cercano al modelo biológico, la hacen adaptarse de manera natural al procesamiento de imágenes. Como toda PCNN, la ICM genera una serie de imágenes binarias (debido al efecto auto-onda de la red), una imagen por cada época, que son variaciones de una imagen original. Para realizar una evaluación de la mejor imagen segmentada, se aplican dos criterios de evaluación o métricas: la Métrica del Contraste del Nivel de Gris (GC), y la Entropía (H), y se realiza una comparativa con el método clásico de Canny. La organización del trabajo es el siguiente: A manera de ubicación, primero se tratan los temas de Segmentación y RNA de manera general, seguido del tema de las PCNN y de la ICM. Posteriormente se da una explicación de la experimentación realizada, se incluye una Discusión de Resultados y finalmente se dan las conclusiones y el trabajo futuro.

## 2. Marco Conceptual

La siguiente Sección tiene la finalidad de ubicar al lector sobre los fundamentos teóricos involucrados.

### A. Segmentación

La segmentación de imágenes es el proceso mediante el cual, una imagen es dividida en sus partes constituyentes de acuerdo con sus atributos, como la intensidad de cada pixel, valores espectrales o sus propiedades de textura obteniéndose las regiones más sobresalientes [1]. Separar los objetos del fondo de una imagen mediante binarización, es el proceso básico de la segmentación, lo cual es utilizado para la clasificación y reconocimiento de objetos en diferentes campos de la visión artificial (Fig. 1). La segmentación por detección de bordes, generalmente se realiza por métodos basados en operadores locales sustentados en aproximaciones de la primera y segunda derivada, lo que requiere de cálculos matemáticos laboriosos. Entre las técnicas que se han utilizado para dar solución al problema de segmentación, el más simple y efectivo es el basado en la determinación del umbral del nivel de gris, pero es muy difícil seleccionar un umbral apropiado [1].

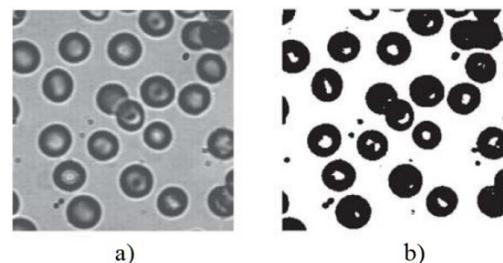


Figura 1. Ejemplo de Segmentación. a) Imagen original, b) Imagen Segmentada [1].

### B. Redes Neuronales Artificiales

De manera general [2][3], las Redes Neuronales Artificiales, son modelos matemáticos procesadores de información, que emulan el sistema nervioso de los organismos vivos. Son adaptables, dado que responden a cambios estructurales en el proceso de generación de datos. La arquitectura típica de una Red Neuronal está conformada por una serie de unidades llamadas nodos, células o neuronas, organizadas en capas, e interconectadas de acuerdo con una

arquitectura particular, dependiendo del propósito de la misma. Cada nodo en sí es un procesador que recibe una señal de entrada y emite una señal de salida hacia otros nodos. La red consta de dos capas externas, una de entrada de datos, una de salida, y una o más capas intermedias llamadas capas ocultas. A cada conexión entre dos nodos se le asigna un “peso”, o ponderación, que es la información actual de ese nodo necesaria para realizar una acción, dependiendo de la excitación, o señal de entrada. La tarea de la Red es autoajustar los pesos sinápticos mediante un algoritmo de aprendizaje inherente, para cumplir con su propósito de manera óptima (ver Fig. 2). Las Redes Neuronales anteriores corresponden a la llamada segunda generación que se caracterizan por aplicar una función de activación con un conjunto continuo de posibles valores de salida a una suma pondera de entradas. Las Redes Neuronales tipo Perceptron (o compuertas de umbral), basadas en las neuronas de McCulloch y Pitts, corresponden a la primera generación [4].

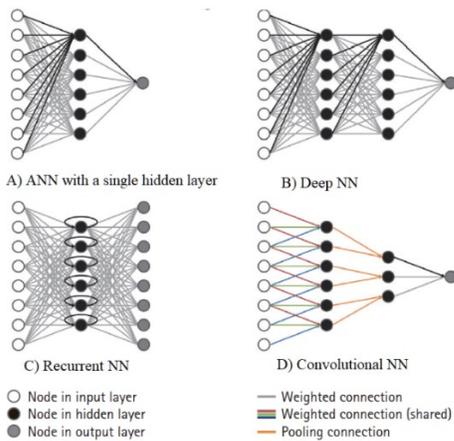


Figura 2. Representación esquemática de tipos de Redes Neuronales Artificiales [5].

### C. Redes Neuronales Pulso-Acopladas

Se pueden encontrar en la literatura científica diversos modelos de Redes Neuronales Pulso Acopladas (PCNN), que corresponden a la llamada tercera generación de Redes Neuronales Artificiales (RNA), y cuya función es emular el comportamiento de la corteza visual de los mamíferos [4]. Estos modelos fueron inspirados en el modelo pionero de Hodgkin-Huxley que fue uno de los primeros intentos de emular de manera cercana a una neurona biológica, pero que tiene un costo computacional alto. *Eckhorn* [6] introdujo un modelo neuronal para emular la corteza visual de mamíferos, cuyo esquema se muestra en las Figs. 3 y 4. El modelo consta de dos compartimentos de entrada llamados el *Feeding* y el

*Linking*. El *Feeding* recibe un estímulo tanto externo, como local. El *Linking* recibe un estímulo local. El *Feeding* y el *Linking* se combinan para crear un voltaje (potential) de membrana  $U_m$  que se compara con un umbral local  $\Theta$ , para producir la salida. La PCNN se basa en gran medida en el modelo *Eckhorn*, excepto por algunas modificaciones requeridas para la digitalización (ver Fig. 4).

El sistema de ecuaciones (1) a (5) describe el modelo PCNN [1] [6].

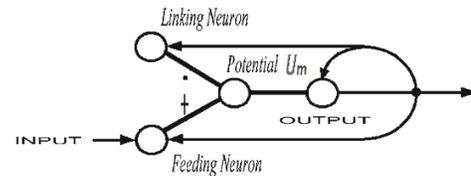


Fig. 3. Modelo neuronal de Eckhorn [6]

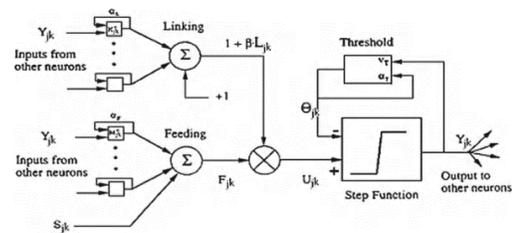


Fig. 4. Representación esquemática de una neurona PCNN [6].

$$F_{i,j}[n] = e^{-\alpha F} F_{i,j}[n-1] + V_F \sum_{k,l} M_{i,j,k,l} Y_{k,l}[n-1] + S_{i,j} \quad (1)$$

$$L_{i,j}[n] = e^{-\alpha L} L_{i,j}[n-1] + V_L \sum_{k,l} W_{i,j,k,l} Y_{k,l}[n-1] \quad (2)$$

$$U_{i,j}[n] = F_{i,j}[n](1 + \beta L_{i,j}[n]) \quad (3)$$

$$T_{i,j}[n] = e^{-\alpha T} T_{i,j}[n-1] + V_T Y_{i,j}[n-1] \quad (4)$$

$$Y_{i,j}[n] = \begin{cases} 1 & \text{si } U_{i,j}[n] > T_{i,j}[n-1] \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Cada compartimento recibe entradas de sus neuronas vecinas a través de los pesos sinápticos  $M$  y  $W$  respectivamente (ver Ecs. 1 y 2). Cada uno de ellos retiene su estado previo, pero con un factor de decaimiento. Los valores de estos dos compartimentos están dados por las ecuaciones 1 y 2, donde  $F_{ij}$  es del *Feeding* de la neurona  $(i, j)$ , y  $L_{ij}$  es el *Linking*. Las  $Y_{kl}$  son las salidas de las neuronas de una iteración anterior  $[n-1]$ . Los parámetros  $V_F$  y  $V_L$  son constantes normalizadas. Como antes, el  $F_{ij}$  y el  $L_{ij}$  se combinan para crear el estado interno  $U$  de la neurona, combinación que es controlada por la fuerza  $\beta$  del *Linking*, según la Ec. 3. Posteriormente este estado interno

de la neurona se compara con un umbral dinámico  $T$ , para producir la salida  $Y_{ij}[n]$ , la que es 1 si el estado interno actual de la neurona es mayor que el umbral, de otra manera es 0. Los pesos sináptico  $M$  y  $W$ , normalmente son *kernels* (máscaras) de convolución de tipo gaussiano que emulan las interacciones con otras neuronas, y generalmente de una dimensión de  $3 \times 3$ , dado que aumentar el tamaño no siempre garantiza mejores resultados, pero sí aumento de costo computacional [6].

#### D. Modelo de Intersección Cortical (ICM)

Este modelo es un caso especial de las PCNN donde la fuerza  $\beta$  del *Linking* es igual a cero, y por lo tanto no hay *Linking*, sólo existe el *Feeding* [7] (Fig. 5).

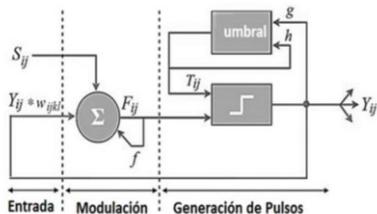


Fig. 5. Desarrollo del estado interno de una neurona ICM [6][7].

Este modelo intenta minimizar el costo computacional, pero mantiene la efectividad del modelo original cuando se aplica a procesamiento de imágenes. El modelo ICM se conforma de un sistema mínimo de ecuaciones que consiste en dos osciladores acoplados, un número pequeño de conexiones, y una función no lineal. El sistema de ecuaciones que describe el modelo ICM es el siguiente [1] [6] [8]:

$$F_{i,j}[n] = f F_{i,j}[n-1] + \sum_{k,l} W_{i,j,k,l} Y_{k,l}[n-1] + S_{i,j} \quad (6)$$

$$T_{i,j}[n] = g T_{i,j}[n-1] + h Y_{i,j}[n-1] \quad (7)$$

$$Y_{i,j}[n] = \begin{cases} 1 & \text{si } F_{i,j}[n] > T_{i,j}[n-1] \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases} \quad (8)$$

El estímulo de la red es  $S$ , es decir, la imagen de entrada. El estado de la neurona ahora es  $F$ , y la salida es  $Y$ , y el estado del umbral dinámico es  $T$ . Ambos parámetros  $f$  y  $g$  deben ser menores que uno, y  $f$  debe de ser mayor que  $g$  para asegurar que el estado del umbral eventualmente disminuya, y de esta manera la neurona se dispare nuevamente. El parámetro  $h$  debe tener un valor alto para que incremente el umbral, justo después de que se dispara la neurona. Las conexiones entre neuronas son emuladas por los pesos sinápticos  $W$ .

#### E. Segmentación Mediante ICM

ICM genera una serie de imágenes binarias (una imagen por cada época), que son variaciones de una imagen original en tonos de gris y que son resultado del efecto "auto-onda" de las redes PCNN (Fig. 6).

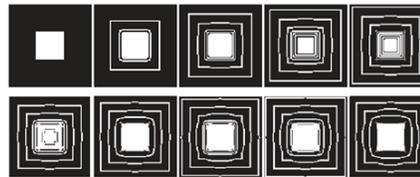


Fig. 6. Salidas de una Red Pulsante para nueve épocas (efecto "auto-onda") [1].

Cada pulso-imagen con la selección apropiada de parámetros, puede ser pensada como una imagen segmentada de la original, pero ¿cómo lo hace la ICM? Se puede analizar de manera breve. En una neurona que recibe el estímulo de la entrada  $S$  (de un pixel de la imagen), su actividad interna aumenta hasta que supera el umbral  $T$ . En ese momento la neurona se dispara, lo que provoca que el umbral aumente hasta alcanzar un valor máximo, después de lo cual su valor comienza a decrecer hasta que nuevamente cae por debajo del estado interno de la neurona, provocando nuevamente su disparo, y así sucesivamente. Este proceso da lugar a la naturaleza pulsante de las PCNN. Cuando una neurona (o grupo de neuronas) se dispara, se produce el efecto de auto-onda que emana del perímetro de ese grupo. Las auto-ondas se definen como ondas de propagación normales que no se reflejan ni refractan. Este efecto es una de las características que distinguen a la Redes Neuronales Pulso-Acopladas, como la ICM, de otras redes neuronales. La segmentación en la ICM se produce debido a que los grupos de neuronas con estado interno similar tienden a pulsar al unísono, de esta manera, los bordes y/o regiones se obtienen a medida que el efecto de auto-onda se expande de estos segmentos. El aspecto más importante es la calidad inherente en la segmentación de la ICM. La ICM produce bordes finos y limpios en imágenes binarias. La segmentación obtenida se muestra como sólida y uniforme en la salida de la ICM. Los bordes y/o regiones también tienen la misma intensidad en la salida, aunque los bordes de entrada pueden tener un gradiente de intensidades. De esta manera, la ICM es un buen preprocesador para la segmentación, dado que obtiene la información esencial de una imagen (bordes, texturas y regiones) [6].

### 3. Diseño de los Experimentos

La segmentación mediante el modelo computacional de ICM no tiene un mecanismo de paro, así que debe ser implementada por el usuario. Se puede emplear un cierto número de épocas. Si este número es grande, se tiene el mismo

número de imágenes segmentadas, por lo cual surge la pregunta: ¿Cuál de todas estas imágenes es la mejor imagen segmentada? Precisamente este es el trabajo que realizan las métricas de la Entropía y del Contraste del Nivel de Gris, que seleccionan la mejor imagen segmentada como aquella que observa el máximo valor de Entropía o máximo valor del Contraste del Nivel de Gris. Por este motivo, en este trabajo se planteó el objetivo de implementar y experimentar con la variante de la PCNN llamado Modelo de Intersección Cortical (ICM) para la segmentación de imágenes digitales del cerebro humano, evaluado con las Métricas del Contraste del Nivel de Gris (GC) y de la Entropía (H), y realizar una comparación con el método clásico de detección de bordes en imágenes digitales Canny, que al igual que el método Sobel, han resistido la prueba del tiempo posicionándose como los métodos clásicos mejores para detección de bordes [9] y/o regiones. Para este propósito, se utilizaron imágenes digitales de resonancia magnética IRM [10], con las cuales se alimentó en forma consecutiva la Red Neuronal ICM, iterando un número de 40 épocas.

El algoritmo ICM y la selección de imagen (Fig. 7) son los siguientes:

- 1) Alimentar la red ICM con la imagen a procesar.
- 2) Declarar e Inicializar a cero las variables del modelo:  $F_{ij}$ ,  $T_{ij}$ ,  $Y_{ij}$  así como sus correspondientes variables que representan un estado anterior, dado que el modelo así lo requiere, y lo mismo para los parámetros  $f$ ,  $g$  y  $h$ .
- 3) Normalización de pixeles de la imagen de entrada para conformar el estímulo  $S_{ij}$  de la Red Neuronal ICM.
- 4) Aplicación de la matriz gaussiana de convolución  $W_{ijkl}$  a la matriz  $Y_{kl}$  anterior, para emular la interacción de neuronas vecinas en cada pixel de la imagen de entrada.
- 5) Cálculo de las variables  $F_{ij}$ ,  $Y_{ij}$ . Si  $F_{ij}$  supera a  $T_{ij}$  anterior, la neurona se dispara.
- 6) Cálculo de  $T_{ij}$ .
- 7) Asignar los valores actuales de  $F_{ij}$ ,  $Y_{ij}$  y  $T_{ij}$  a sus variables correspondientes del estado anterior, y desnormalizar la salida  $Y_{ij}$  que se transformará en la imagen segmentada de esa época. En ese momento se genera el pulso imagen.
- 8) Cálculo de las métricas Entropía (H) y/o Contraste de Nivel de Gris (GC).
- 9) Selección de la imagen de salida de acuerdo a las métricas H y GC.

Hay varios conjuntos de valores que sugiere la literatura para los parámetros  $f$ ,  $g$ ,  $h$  del modelo ICM mientras cumplan con las condiciones dadas anteriormente. Normalmente se

proponen algunos conjuntos de valores, por ejemplo,  $\{0.9, 0.8, 20\}$ ,  $\{0.4, 0.34, 20\}$  para  $f, g, h$  respectivamente. En este trabajo se utilizó el primer conjunto de valores para las métricas de la Entropía y el Contraste del Nivel de Gris, por ser éstos los más empleados en la literatura especializada. Se ha encontrado que estos parámetros son sensibles a la forma estructural de la ecuación de la métrica, por lo tanto, se tienen que sintonizar los parámetros con las ecuaciones utilizadas, después de lo cual se mantienen fijos.

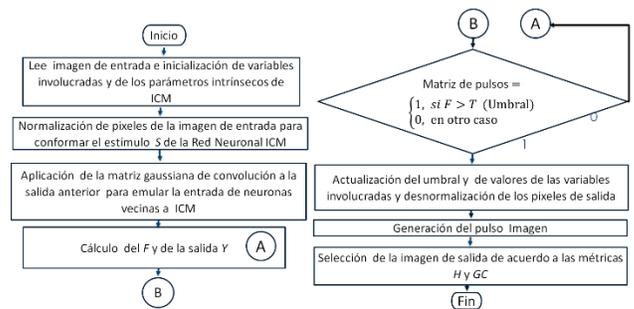


Fig. 7 Diagrama de flujo abreviado del algoritmo ICM y selección de imagen.

Es importante tener claro que hay tantas neuronas como pixeles tiene la imagen de entrada, por lo tanto, las cantidades  $F_{ij}$ ,  $S_{ij}$ ,  $Y_{ij}$ ,  $T_{ij}$  representan arreglos matriciales del mismo tamaño que la imagen. Dicho de otra manera: cada pixel es procesado por una neurona, por lo que la Red ICM, es una Red con las neuronas dispuestas en un plano que se corresponde uno a uno con los pixeles de la imagen. De forma que, para acceder a cada pixel, debemos recorrer la imagen pixel por pixel, normalizar cada uno de ellos, e introducirlos a sus neuronas correspondientes. Como se dijo, este es el estímulo introducido en la Red. Se utilizó OpenCV como apoyo para el procesamiento de imágenes, C++ como lenguaje de programación, y Visual Studio como entorno de desarrollo. La convolución, *kernel* o máscara gaussiana utilizada para emular la interacción de las neuronas vecinas, es una matriz de  $3 \times 3$  con valores  $\{0.5, 1, 0.5\}$ ,  $\{1, 0, 1\}$ ,  $\{0.5, 1, 0.5\}$ .

La Entropía es una propiedad estadística que refleja la cantidad de información contenida en una imagen, y está dada por:

$$H(s) = -p_1 \log_2 p_1 - p_0 \log_2 p_0 \quad (9)$$

donde  $p_1$  y  $p_0$  son las probabilidades de aparición de 1's (unos), y 0's (ceros) en la imagen segmentada, respectivamente [1]. Para una Entropía máxima, hay balance en la probabilidad de aparición entre estos dos valores, por lo tanto, una entropía máxima, revelará el mejor umbral que seleccionará la mejor imagen segmentada.

La métrica del Contraste en el Nivel de Gris GC (Gray-level Contrast Measure) nos dice que en una imagen segmentada  $f(x, y)$  dada en nivel de gris, que consiste en objeto y fondo con promedios  $f_o$  y  $f_b$  respectivamente, una Medida del Contraste del Nivel de Gris puede calcularse mediante [1]:

$$GC = |f_o - f_b| / (f_o + f_b) \tag{10}$$

El algoritmo Canny [11], se realiza en 5 fases. En la primera fase “Supresión de ruido”, se aplica un *kernel* gaussiano de  $5 \times 5$ . En la fase 2, se calcula la intensidad y dirección del gradiente aplicando máscaras de convolución en direcciones  $x$ ,  $y$ . En la fase 3, se aplica un criterio llamado: “No aplicación de Supresión Máxima” que elimina pixeles que no sean parte del borde, quedando solo líneas finas. En la fase 4, llamada Histéresis, se aplican las condiciones para que un pixel forme parte de un borde, de acuerdo a la ubicación del valor del gradiente del pixel, en tres de los intervalos separadas por dos umbrales, un umbral superior y uno inferior. En este trabajo se utilizó el detector de bordes Canny de Opencv para la segmentación de las imágenes médicas del cerebro humano, y posteriormente se aplicó a cada imagen las métricas de la Entropía y el Contraste del Nivel de Gris con la finalidad de realizar una comparación contra las imágenes segmentadas mediante ICM. Se debe mencionar que se utilizó la imagen dada por defecto en el detector de bordes Canny de Opencv.

#### 4. Resultados Obtenidos

Se procesaron 150 imágenes [10] del cerebro humano mediante:

- Detector de bordes Canny con código de Opencv.
- Segmentación con la Red Neuronal ICM.

En el caso de ICM se utilizaron las métricas de la Entropía y del Contraste del Nivel de Gris para seleccionar la mejor imagen de entre las imágenes segmentadas. En el caso de Canny, se aplicaron también ambas métricas de la Entropía y Contraste del Nivel de Gris a la imagen segmentada obtenida por defecto para realizar la comparación contra ICM.

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a estos resultados. En las gráficas de las Figs. 8 y 9 se observa la comparación entre ICM y Canny [11] de Entropía y el GC para 150 imágenes. Se puede observar mejor desempeño de ICM en ambos casos, el cual fue de 30%.

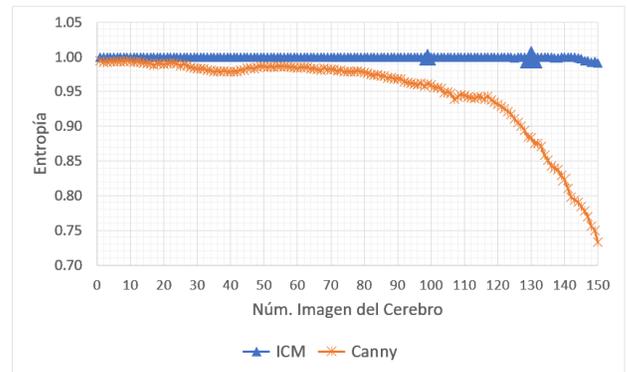


Fig. 8. Comparación de la Entropía para 150 imágenes aplicando ICM y Canny.

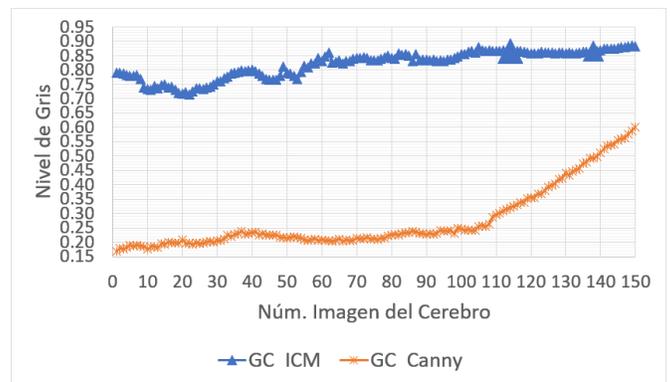


Fig. 9. Comparación del Contraste del Nivel de Gris para 150 imágenes aplicando ICM y Canny.

Enseguida se muestran algunas imágenes digitales originales del cerebro humano [10], Fig. 10. Posteriormente se muestran las correspondientes imágenes segmentadas mediante ICM utilizando ambas métricas (Figs. 11 y 13), y la segmentación mediante Canny (Figs. 12).

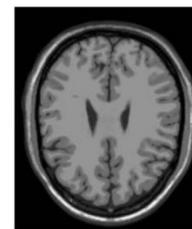


Fig. 10. Imagen original del cerebro humano utilizadas para experimentación [10].



Fig. 11. Ejemplo de segmentación mediante ICM y la Entropía aplicada a la imagen original dada. Entropía observada: 0.9999.



Fig. 12. Ejemplo de detección de bordes mediante Canny para la imagen original dada. Entropía observada: 0.9559. GC observado: 0.2417



Fig. 13. Ejemplo de detección de regiones mediante ICM y GC, aplicado a la imagen original dada. GC observado: 0.8563.

## 5. Discusión de Resultados

En el aspecto cuantitativo, con las condiciones y finalidad dadas en este trabajo, ICM supera a Canny, utilizando 150 imágenes y las métricas mencionadas. El uso de otra métrica, o aumentando el número de imágenes, podría variar los resultados.

Un análisis cualitativo al igual que la utilización de imágenes digitales del cerebro humano con “ruido”, corresponden a un trabajo posterior, en el que se podrá realizar una comparación con la opinión de un experto humano.

Los tiempos de procesamiento, al igual que una comparación de los métodos empleados con técnicas más actuales, por el momento quedan fuera del alcance del presente trabajo.

En cuanto a aplicaciones potenciales, este trabajo se considera como preparación para la detección de lesiones en imágenes digitales del cerebro humano utilizando una Red Neuronal Pulsante.

## 6. Conclusiones

- Se Implementó el Modelo de Intersección Cortical pulsante ICM para la segmentación de imágenes digitales del cerebro humano, evaluado con las Métrica de la Entropía y el Contraste del Nivel de Gris.
- ICM se comporta mejor en Entropía y GC que Canny.
- La ventaja de ICM es que, al tener un proceso paralelo, es más eficiente.

Trabajo futuro:

- Hacer comparativas contra otros métodos de segmentación.
- Incluir otras métricas para medir la calidad de cada método, por ejemplo, Entropía Cruzada [1] o *SSIM* [13].
- Realizar extracción de características de las imágenes de ICM de lesiones del cerebro.

## 7. Referencias

- [1] Y. Ma, K. Zhan, and Z. Wang, Applications of Pulse-Coupled Neural Networks. Springer, 2010.
- [2] A. Thakur, “Early Diagnosis of Ischemia Stroke using Neural Network”. Birla Institute of Technology and Science, Pilani, Rajasthan. Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS) 11 – 13 October 2009, Batu Ferringhi, Penang, MALAYSIA
- [3] S. Haykin, Neural networks and learning machines. Vol.3. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009.
- [4] W. Maass.: Networks of Spiking Neurons: The Third Generation of Neural Network Models. Institute for Theoretical Computer Science. Technische Universitit Graz, NeuralNetworks, Vol. 10, No. 9, pp. 1659-1671, 1997.
- [5] Eun-Jae Lee, Yong-Hwan Kim, Namkug Kim, Dong-Wha Kang, 2017. Deep into the Brain: Artificial Intelligence in Stroke Imaging. Journal of Stroke 2017;19(3):277-285
- [6] T. Lindblad and J. M. Kinser, Image Processing Using Pulse-coupled Neural Networks. Springer, 2005.
- [7] E. Ortiz, M. Mejía, “Filtrado de ruido Gaussiano mediante redes neuronales pulso-acopladas”, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Departamento de Ciencias Computacionales, Cuernavaca, Morelos, México. 2017.
- [8] M.B. Zarate. Extracción de Características de Imágenes Digitales mediante una Red Neuronal Artificial Pulsante. Tesis de Maestría en Ciencias de la Computación, CENIDET. 2014.
- [9] G. Pajares, J.M. De la Cruz. “Visión por Computador Imágenes digitales y aplicaciones”, 2da. Edición, Alfaomega Ra-Ma, ISBN:978-970-15-1356-9, 2008.
- [10] Simulated Brain Database, <http://brainweb.bic.mni.mcgill.ca/brainweb/>, última visualización 03/08/2019.
- [11] [https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/canny\\_detector/canny\\_detector.html](https://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/imgproc/imgtrans/canny_detector/canny_detector.html). Última visualización: 10/08/2019
- [12] R. Kaur, A. Doegar. Localization and Classification of Brain Tumor using Machine Learning & Deep Learning Techniques. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-8, Issue-9S, July 2019.
- [13] U. Ekblad, J. M. Kinser, J. Atmer, and N. Zetterlund, “The intersecting cortical model in image processing,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 525, no. 1–2, pp. 392–396, Jun. 2004.

## 8. Biografías

**José Luis Soto-Piña.** Es Físico Matemático por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí UASLP) y actualmente estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación, línea de Inteligencia Artificial, en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET).

**Manuel Mejía-Lavalle.** Es Doctor en Ciencias Computacionales por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y profesor - investigador en el Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Perteneció al IEEE habiendo sido presidente del Capítulo de Computación de la Sección Morelos, México en el período 2011-2012. Cuenta con Perfil Deseable PRODEP. Ha pertenecido también al Sistema Nacional de Investigadores, al Sistema Estatal de Investigadores (Morelos), a la Sociedad Mexicana de Inteligencia Artificial, y a la Academia Nacional de Investigación en Ciencias Computacionales. Investiga principalmente en las áreas de Inteligencia Artificial y de Redes Neuronales Artificiales.

**Kevin Salvador Aguilar Domínguez.** Es estudiante de Doctorado en Ciencias Computacionales en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) / Tecnológico Nacional de México (TecNM), egresado de la misma como Maestro en Ciencias Computacionales. Ingeniero en Mecatrónica por la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata (UTEZ). Participación; en diferentes torneos y congresos nacionales y estatales. Investiga principalmente en el área de la Inteligencia Artificial y Redes Neuronales Artificiales.

**José Ruiz-Ascencio** es Físico por la UNAM, Master of Science en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Stanford y Doctor of Philosophy por la Universidad de Sussex. Ha sido profesor e investigador de tiempo completo en la UNAM, la Universidad de Barcelona y el ITESM Campus Morelos, y ha trabajado en automatización industrial con Rockwell Allen-Bradley y otros. Es profesor investigador del Departamento de Ciencias Computacionales del CENIDET desde 1995, Miembro Vitalicio del IEEE y actualmente pertenece al SNI nivel I.

**Dr. Gerardo Reyes-Salgado.** Dr. en Ciencias Cognitivas por el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble (Francia). Maestro en Ciencias Computacionales por el CENIDET (México). Ha sido profesor dentro y fuera de México en instituciones de educación media superior, superior y posgrados. Miembro del SNI, nivel I. Algunas de las distinciones recibidas son: Reconocimiento al Mérito Académico de la Región V, otorgado por la Asociación Nacional de Facultades y Escuelas de Ingeniería (ANFEI) en 2013; Miembro honorario del Sistema Estatal de Investigadores en Morelos por los años 2009 al 2017; Colaborador honorario de la Universidad Rey Juan Carlos (URJC) de Madrid, España y Miembro del Programa “Distinguished Visitors Program Latin America (DVP)” del IEEE Computer Society (2007-2009 y 2011-2013).

# Optimización de Contenedores para esferas navideñas, mediante evolución diferencial

N. González-León<sup>1,2,a</sup>, L. Flores-Pulido<sup>2,b</sup>, E-A. Portilla-Flores<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de la Sierra Norte de Puebla. Div. de Tec. y Sist. de Información. México

<sup>2</sup> Universidad Autónoma de Tlaxcala. Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología. México

<sup>3</sup> Instituto Politécnico Nacional, CIDETEC. Ciudad de México

<sup>a</sup> [noemiglag@hotmail.com](mailto:noemiglag@hotmail.com), <sup>b</sup> [aicitel.flores@gmail.com](mailto:aicitel.flores@gmail.com), <sup>c</sup> [laportilla@ipn.mx](mailto:laportilla@ipn.mx)

**Resumen**—En este documento se presenta la propuesta de un algoritmo llamado NOEA para la optimización de la producción de contenedores de esferas navideñas; con la finalidad de modelar el proceso en una máquina blisteadora y suajadora de tal forma que su producción sea de acuerdo a la demanda, ocupando los recursos necesarios al realizar sus tareas y obteniendo como beneficio un ahorro energético. La metodología ocupada es Evolución Diferencial perteneciente a la computación evolutiva. El algoritmo NOEA es sencillo de implementar, realiza búsquedas globales, se basa en reglas de factibilidad de Deb, no requiere recursos de cómputo excesivos y su tiempo de respuesta es razonable. La importancia del algoritmo propuesto radica en haber logrado una mejora en el diseño de las tapas del contenedor de esferas navideñas.

*Palabras clave.* Optimización, Contenedor, Evolución diferencial, Blisteadora, Suajadora.

## 1. Introducción

Durante los últimos 40 años el Municipio de Chignahuapan, Puebla, se ha caracterizado por la producción de esferas de vidrio soplado de forma artesanal; existen más de 350 talleres y 6 fábricas de esferas dedicadas a la elaboración de esfera navideña. Según Ángel Rojas Lecona [1], una sola fábrica produce al año al menos diez millones de esferas. En el 2012 llegaron a producir más de 300, 000, 000 de esferas. El producto es exportado a Estados Unidos, Centro y Sudamérica, como Argentina e Italia en Europa.

El proceso de producción de esferas termina con el empaquetado. Uno de los grandes retos a los que se enfrenta la pequeña industria en la región es la elaboración del contenedor de esferas de vidrio soplado para su distribución, transportación, almacenamiento, manipulación y venta del producto de tal forma que permita ser entregado al cliente en condiciones óptimas. El embalaje se convierte entonces, en una ventaja competitiva respecto a productos competidores de la misma calidad.

Existen diferentes tipos de embalajes. Los materiales usados durante el proceso del empaquetado de esferas navideñas de vidrio soplado es el cartón, los inconvenientes de utilizar este tipo de material es no soportar mucho peso, siendo una práctica frecuente el estibar el producto por parte de los pequeños productores, ocasionando mermas hasta tres esferas rotas por caja. Otro empaque muy utilizado por los productores de

esferas es la combinación de policloruro de vinilo conocido como PVC y cartón.

En la Sierra Norte de Puebla, prevalece el clima templado, frío y húmedo la mayor parte del año, siendo una desventaja la utilización de envases elaborados de cartón en la región, ya que bajo estas condiciones ambientales el envase se vuelve blando, provocando una mayor pérdida del producto. El proceso de los contenedores cilíndricos de Policloruro de Vinilo (PVC) para esferas, actualmente se realiza de forma manual, para las tapas del contenedor, el material de PVC es termoformado; para el armado del cuerpo del cilindro, es necesario cortar un cuadrado con una guillotina, un cúter o con tijeras, posteriormente es utilizado pegamento para unir los costados del material, son colocadas a las tapas perforadas un cordón al contenedor con el propósito de sostener el producto para transportarlo.

El empaque más vendido es el de 60 esferas, el calibre de PVC es de 3.5 pulgadas, llegándose a vender aproximadamente 23,000 o más empaques al año de este material por taller o pequeño productor. Una persona produce 50 contenedores cilíndricos de PVC de forma manual al día. La presente propuesta se basa en mejorar la calidad del proceso de elaboración de embalajes cilíndricos para almacenar 60 esferas, mediante la operación de una máquina blisteadora y una suajadora, siendo necesario generar una solución óptima que garantice la calidad del embalaje.

Se sabe hasta el momento cual es la forma que debe de tener un diseño de embalaje para almacenar, transportar y conservar en buen estado productos esféricos navideños. Se tiene ya establecido un procedimiento mediante el cual es posible construir un embalaje apropiado para la producción en línea de dicho diseño. Es posible, entonces, mediante un diseño electrónico inteligente por medio de Evolución Diferencial definir la construcción y producción en línea de un embalaje apropiado para material esférico navideño hecho de vidrio soplado. La producción de dicho embalaje, debe cumplir las normas y medidas adecuadas para que la técnica inteligente logre el diseño de manera adecuada.

Los embalajes pueden ser clasificados en tres categorías, flexibles, semirrígidos, sellantes o adhesivos. Los semirrígidos

son más gruesos que 0.127mm, los flexibles cuyo espesor es inferior a 0.127 mm y los selladores o adhesivos requieren múltiples capas juntas requiriendo típicamente calor y presión. Actualmente en el mercado americano los recipientes dominan el 51 % del mercado total.

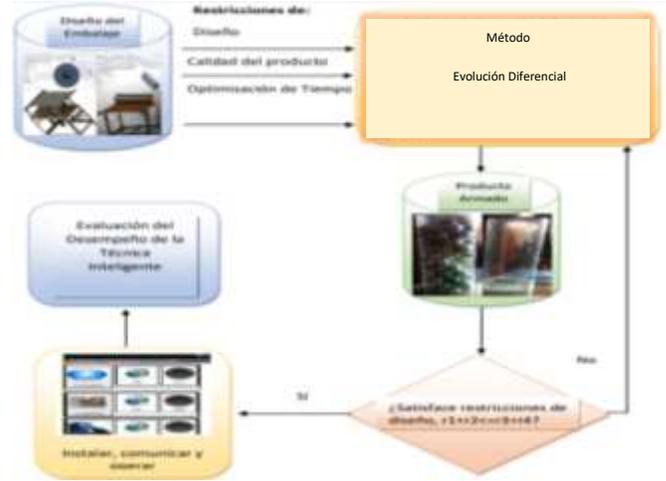
## 2. Revisión del estado del arte

Se consulta a Fellows, quien en el 2009 [2], ocupó el método de termoformado para el sellado y llenado de envases rígidos logrando un ahorro de 10 a 15 % del producto. En el 2017 [3], Fellows logró una reducción de costos debido a la preocupación sobre la energía y consumo de materiales, uno de los inconvenientes encontrados son los sellos ya que son la parte más débil de un contenedor, estos pueden sufrir averías durante su producción, se estudió a Mohammad, et al, en el 2015 [4], por el comportamiento elástico del contenedor y para mejorar el rendimiento del material. Se revisó el modelado de envases de Li, en el 2017 [5] por las características de los contenedores que son permeables a la humedad. Se analizó la propuesta para resolver un problema de optimización con restricciones asociadas a un mecanismo de Vega-Alvarado et al. 2014 [6], ellos utilizaron un algoritmo de evolución diferencial modificado, aplicando una selección tipo torneo, basada en las reglas de factibilidad de Deb. Se estudió a Zapata, et al. 2017[7] quienes adaptaron un algoritmo L-SHADE automáticamente a los parámetros con mutación (F) y a la cruce (CR) a través de una memoria de parámetros, controlando la población (NP) usando una función lineal, incorporaron una estrategia de manejo de restricciones a L-SHADE con el fin de optimizar tres casos de estudio de un mecanismo de cuatro barras y se llama C-LSHADE, compararon su desempeño con DE/rand/1/bin utilizando parámetros aleatorios para resolver problemas mecánicos de optimización, realizaron un experimento en el que compararon los resultados obtenidos por los dos algoritmos y otro en el que analizaron el comportamiento de convergencia de cada uno. Se consultó a Brest, et al.; en el 2016 [8 y 9] quienes propusieron una versión extendida de L-SHADE llamada iL-SHADE para resolver problemas de optimización de parámetros reales de un sólo objetivo. Realizaron los experimentos en 30 funciones de referencia y de cuatro dimensiones, siendo altamente competitivo que L-SHADE original.

## 3. Problema de Optimización

Sea el problema de optimización numérica mono objetivo descrito por 1 hasta 7, para obtener la solución al problema de diseño para minimizar los costos de producción generados por el consumo de la mica de PVC, para la elaboración de contenedores de esferas navideñas (véase la figura 1); esto es mediante una definición adecuada de la representación de un

individuo de forma que siempre se generen individuos válidos. La representación de cada uno de los términos de la función de aptitud puede observarse en las Figuras 2 y 3.



**Fig. 1.** Proceso para el diseño óptimo del contenedor

Función propuesta para el cálculo óptimo del contenedor.

$$\text{Minf}(P) = (-pd + \infty po - ps - \beta pf) + sc, \quad p \in \mathbb{R}^5 \quad (1)$$

f: Función de aptitud o fitness

pd: área desperdicio

pf: área fuera del rectángulo penalizada

po: área ocupada

ps: área solapada

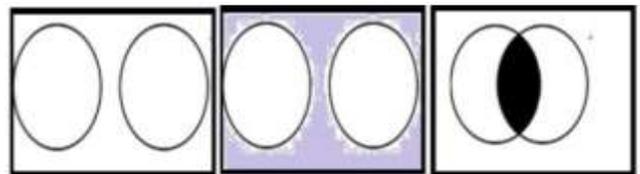
sc: superficie lateral del cilindro

$\infty$ : constante de peso para la penalización

$\beta$ : 2000

Sea entonces el vector de variables de diseño para el mecanismo dado por:

$$p = [p1, p2, p3, p4, p5]^T \quad (2)$$



**Fig. 2.** a) Área ocupada b) Área de desperdicio c) Área solapada

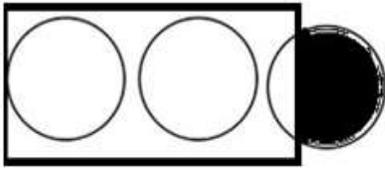


Fig. 3. a) Área fuera del rectángulo penalizada ocupada

Las restricciones del problema durante la evolución están sujetas a:

$$p_o \leq 1000 \text{ cm}^2 \quad (3)$$

$$p_d \leq 14 \text{ cm}^2 \quad (4)$$

$$p_s = 0 \text{ cm}^2 \quad (5)$$

$$p_f \leq 0.02 \text{ cm}^2 \quad (6)$$

$$s_c \leq 0.0336 \text{ cm}^2 \quad (7)$$

### 3. Metodología

Los algoritmos evolutivos de búsqueda estocásticos están basados en el principio de la supervivencia del más apto de Charles Darwin, constan de los siguientes componentes:

- Estructuras que se replican (individuos)
- Una función de aptitud
- Un mecanismo de selección (probabilístico)
- Operadores que actúan sobre los individuos (cruza o mutación)

Los algoritmos evolutivos parten de un conjunto de soluciones generados aleatoriamente (poblaciones), para cada solución se calcula un valor que suele corresponder a la función objetivo que queremos optimizar a este valor se le llama aptitud. Posteriormente, se selecciona un conjunto de padres a los que suele aplicarse al menos un operador genético (cruza o mutación), con cierta probabilidad, es decir, el operador no se aplica a todos los padres. Los nuevos individuos son denominados hijos y posteriormente se mutan. Estos nuevos individuos constituyen una nueva población que reemplazará parcial o totalmente a la anterior.

### 4. Resultados

El modelo inicia con los vectores de los parámetros población  $p$  del algoritmo de evolución diferencial, con NP vectores de parámetros de  $D$  dimensiones, donde cada parámetro puede estar restringido a un rango de valor como se encuentra establecido de la restricción 3 a la 7. La Tabla I muestra la población de individuos que la conforman.

TABLA I. POBLACIÓN DE INDIVIDUOS

Población	Individuo 1	Individuo 2	Individuo 3	Individuo 4	Individuo 5
p1	1	0.4408137	0.9914455	0.1205224	0.0158568
p2	0.14	0.0353393	0.1429880	0.38374385	0.2170337
p3	0	0.5504564	0.9730293	0.66750811	0.285156
p4	0.02	0.8618958	0.9344269	0.94863115	0.1714076
p5	0.336	0.9317397	0.0099103	0.77892231	0.2216880
F(p)	1.496	2.8202451	3.0518001	2.89932782	0.9111423

Mediante la mutación de diferencias se añade la diferencia proporcional de dos individuos  $V_2$  y  $V_3$ , elegidos aleatoriamente de la población aún ( $V_1$ , individuo, target), elegido también aleatoriamente. El nuevo individuo  $M_i$  se denomina individuo mutado o vector mutado.

$$M_i = V_1 + \mu (V_2 - V_3) \quad (8)$$

En la Tabla II. puede observarse el cálculo del vector de la diferencia ponderada entre el individuo 2 y 5 así como la diferencia proporcional que resulta de multiplicar  $\mu$  por 0.8.

TABLA II. CÁLCULO DEL VECTOR DE LA DIFERENCIA PONDERADA

P	Individuo 2	Individuo 5	Diferencia		Diferencia proporcional
p1	0.4408137	0.0158568	0.4249568	$\mu = 0.8$	0.3399654
p2	0.0353393	0.2170337	-0.1816944		-0.1453555
p3	0.5504564	0.285156	0.2653004		0.2122403
p4	0.8618958	0.1714076	0.6904882		0.5523906
p5	0.9317397	0.2216880	0.7100516		0.5680413
F(p)	2.8202451	0.9111423	1.9091028		1.5272822

La constante de mutación  $\mu > 0$ , establece el rango de diferenciación entre los individuos  $V_2$  y  $V_3$  con el objetivo de evitar el estancamiento en el proceso de búsqueda. Tras la mutación se realizó una operación de recombinación sobre cada individuo  $V_1$ (target) para generar un individuo o vector de prueba  $F_i$ , el individuo de prueba es  $F$  es controlado mediante la función de condición establecida en 9:

$$F_i(j) = \begin{cases} M_i(j), & \text{if } rand \leq CR \\ V_i(j) & \end{cases} \quad (9)$$

El Operador de selección decide en base al mejor fitness, si el individuo de prueba  $F_i$  es aceptado y reemplaza al individuo prueba  $F_i$  es rechazado y se conserva el individuo objetivo en la siguiente generación.

$M_i$  el vector mutado y el vector objetivo  $V_i$  seleccionan un número entre 0 y 1, si no se cumple la condición de la fórmula 9, la primera posición pasa al segundo lugar y pasa al primer lugar del vector de prueba. En la Tabla III. Encontramos el cálculo realizado para la obtención del vector mutado

TABLA III. OBTENCIÓN DEL VECTOR MUTADO

Población	Diferencia proporcional		Individuo 4	Vector Mutado $M_i$
p1	0.3399654	+	0.1205224	0.4604878
p2	-0.1453555		0.3837438	0.2383883
p3	0.2122403		0.6675081	0.8797484
p4	0.5523906		0.9486311	1.5010217
p5	0.5580413		0.7789223	1.3469636
F(p)	1.5272822		2.8993278	4.4266100

El índice nos proporciona la posición de cada individuo, opera para generar valores para verificarlos contra de CR, y dependiendo de la condición pasa el valor a ser parte del vector de prueba, entonces se toma un número aleatorio entre 0 y 1 y se le asigna a CR. Entonces se obtiene un número aleatorio y éste dato lo comparamos con CR si es menor pasamos el valor del vector mutado y sin no se cumple la condición de la ecuación 9.

TABLA IV. CÁLCULO DEL VECTOR DE PRUEBA

Población	Vector Objetivo $V_i$		Vector Mutado $M_i$	Vector Prueba $F_i$
p1	1	Cr= 0.3349	0.4604878	1
p2	0.14		0.2383883	0.14
p3	0		0.8797484	0
p4	0.02		1.5010217	0.02
p5	0.336		1.3469636	0.336
F(p)	1.496		4.4266100	1.496

Al comparar el resultado del vector de prueba con el vector objetivo nos percatamos que no existe cambio en el vector de prueba por lo que continua el vector objetivo, cuando el factor de cruza es Cr= 0.3349; pero cuando Cr= 1, entonces se calcula el vector de prueba y se obtiene la primera generación debido a que el resultado del vector de prueba es menor que el vector objetivo como puede observarse en la tabla 5 dando lugar a la primera generación del presente estudio.

TABLA V. CÁLCULO DEL VECTOR DE PRUEBA PARA LA PRIMERA GENERACIÓN CUANDO F = 1.0548761, CR= 1.

Población	Vector Objetivo $V_i$		Vector Mutado $M_i$	Vector Prueba $F_i$
p1	1	Cr= 1	0.4604878	0.46048788
p2	0.14		0.2383883	0.2383883
p3	0		0.8797484	0
p4	0.02		1.5010217	0.02
p5	0.336		1.3469636	0.336
F(p)	1.496		4.4266100	1,0548761

El diseño de la tapa superior e inferior del contenedor o blíster fue elaborado en SolidWorks 2015 para su posterior

elaboración del molde en aluminio para el termoformado del material de PVC.

Algoritmo NOEA

Requiere: se escriben las entradas al vector objetivo

Ensure: salidas

- 1: inicio
- 2: Se declaran el VectorObjetivo, V2, V3, V4, diferencia, diferenciaproportional, VM y VP
- 3: VectorObjetivo [1]= 1;
- 4: VectorObjetivo [2]= 0.14;
- 5: VectorObjetivo [3]= 0;
- 6: VectorObjetivo [4]= 0.02;
- 7: VectorObjetivo [5]= 0.336;
- 8: CR= 1;
- 9: Escribir VectorObjetivo
- 10: for x=1 to 5 do
- 11: VectorObjetivo(x);
- 12: suma=suma+VectorObjetivo(x);
- 13: end for
- 14: Escribir "Suma del Vector Objetivo:", suma
- 15: Escribir "Valores del Vector V2"
- 16: for x=1 to 5 do
- 17: V2(x)=rand();
- 18: Escribir V2(x);
- 19: end for
- 20: Escribir "Valores del Vector V3"
- 21: for x=1 to 5 do
- 22: V3(x)=rand();
- 23: Escribir V3(x);
- 24: end for
- 25: Escribir "Valores del Vector V4"
- 26: for x=1 to 5 do
- 27: V4(x)=rand();
- 28: Escribir V4(x);
- 29: end for
- 30: Escribir "Los datos del Vector Diferencia son:"
- 31: for x=1 to 5 do
- 32: diferencia(x)=V2(x)-V3(x);
- 33: Escribir diferencia(x);
- 34: end for

Fig. 4. Algoritmo NOEA propuesto parte 1

Algoritmo Continuación NOEA	
35:	Escribir "Valores de la diferencia proporcional:"
36:	for x=1 to 5 do
37:	DiferenciaProporcional(x)=diferencia(x)*0.8;
38:	Escribir Diferencia(x);
39:	end for
40:	Escribir "Valores del Vector Mutado:"
41:	for x=1 to 5 do
42:	VM(x)=DiferenciaProporcional(x)+V4(x);
43:	Escribir VM(x);
44:	end for
45:	NCR=rand();
46:	Escribi NCR;
47:	if NCR<CR then
48:	VP(1)=VM(1);
49:	else
50:	VP(1)=VectorObejtivo(1);
51:	end if
52:	NCR=rand();
53:	Escribi NCR;
54:	if NCR<CR then
55:	VP(2)=VM(2);
56:	else
57:	VP(2)=VectorObejtivo(2);
58:	end if
59:	NCR=rand();
60:	Escribi NCR;
61:	if NCR<CR then
62:	VP(3)=VM(3);
63:	else
64:	VP(3)=VectorObejtivo(3);
65:	end if
66:	NCR=rand();
67:	Escribi NCR;
68:	If NCR<CR then
69:	VP(4)=VM(4);
70:	else
71:	VP(4)=VectorObejtivo(4);
72:	end if
73:	NCR=rand();
74:	Escribi NCR;
75:	if NCR<CR then
76:	VP(5)=VM(5);
77:	else
78:	VP(5)=VectorObejtivo(5);
79:	end if
80:	for x=1 to 5 do
81:	sumaVP=sumaVP+VP(x);
82:	end for
83:	Escribir "Resultado del algoritmo"
84:	if sumaVP<suma then
85:	Escribir "La nueva generación esta dada por el vector de prueba VP";
86:	for x=1 to 5 do
87:	Escribir VP(x);
88:	end for
89:	Escribir "suma del vector de prueba es:", sumaVP;
90:	else
91:	"se deja los valores del vector objetivo de la generacion anterior:";
92:	Escribir VectorObjetivo(x);
93:	end if;

**Fig. 5.** Algoritmo NOEA propuesto parte 2

En la figura 4 y 5; se puede consultar el algoritmo propuesto. El experimento fue realizado con la función propuesta para las tapas del contenedor como se observa en 1. Para las pruebas, el algoritmo NOEA es programado en Octave, su tiempo de ejecución varía entre 9.20 a 9.80 segundos.

Zapata, et al., en el 2017[7], ocupa la prueba de suma de rangos de Wilcoxon, en el algoritmo L-SHADE para validar los datos obtenidos, con un nivel de significancia del 95%. C-LSHADE llegó a un mejor resultado de DE/ran/1/bin; C-LSHADE es capaz de encontrar mejores soluciones o iguales que DE, el porcentaje de evaluaciones de la función objetivo es menor que DE, libera al usuario de ajustar los parámetros F, CR Y NP. La principal modificación consistió en agregar a los criterios de factibilidad propuestos por DEB en la etapa correspondiente del mejor individuo, el algoritmo fue capaz de encontrar rápidamente mejores soluciones y libera al usuario de realizar ajustes manuales de parámetros, en base a prueba y error. El algoritmo NOEA se caracteriza por realizar búsquedas globales, es sencillo de implementar, no requiere recursos de cómputo excesivos y su tiempo de respuesta es razonable

El algoritmo iL-SHADE de Brest, et al; 2016 [8 y 9], difiere de L-SHADE al usar los siguientes mecanismos: El mecanismo de actualización almacenó los valores de la memoria histórica de la generación anterior y los usó para

calcular los valores de la memoria histórica para la próxima generación, una memoria  $H$  entradas, y una de ellas contiene valores que son fijos. Esta entrada no se actualiza, pero sus valores son usados para generar los parámetros de control  $CR_i$  y  $F_i$  todos los valores de la memoria histórica en  $M_{CR}$  se inicializa a 0.8 y si  $M_{CR}$  se le asigna el valor terminal, entonces  $M_{CR}$  se restablece a 0.0. Mientras que el algoritmo NOEA, el parámetro de control CR es un número aleatorio entre 0 y 1.

## 5. Conclusiones

Al realizar la verificación del valor del vector de prueba con CR puede observarse en la tabla 5 la suma del vector de prueba es 1.05487618, dato cuyo valor es menor que la suma del vector objetivo, dando lugar a la primera generación cuando el factor de cruce es igual a 1, por lo tanto, se ha logrado una mejoría en el diseño de las tapas del contenedor en la quinta iteración. El algoritmo NOEA es sencillo de implementar, se caracteriza por realizar búsquedas globales, se basa en reglas de factibilidad de Deb, no requiere recursos de cómputo excesivos y su tiempo de respuesta es razonable.

## 6. Referencias

- [1] García - de Loera, F.: Elaboración de esferas en Chignahuapan. \url{http://wikipuebla.poblanerías.com/galería-elaboración-de-esferas-en-chignahuapan},(Consulta realizada el 31 de Julio de 2017).
- [2] Follows: Felling and sealing of containers. Elsevier. 26. pp. 782-803 (2009)
- [3] Follows: Felling and sealing of containers. Elsevier. 25. pp. 1045-1076 (2017).
- [4] Mohammad S. I. and Liyong T.: Effects of initial blister radius and shaft diameter on energy release rate of metal-polymer composite coating, International Journal of Adhesion and Adhesives,(2015).pp 1-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.07.007>.
- [5] Li, Y. and Chen, Y. : Modeling in pharmaceutical packaging, Abbvie Inc., North Chicago, IL, United States, Novast Laboratories, Ltd., Nantong, China. 12. pp. 317-341 (2017)
- [6] Vega-Alvarado, E., Santiago-Valentín, E., Sánchez-Márquez, A., Portilla-Flores E-A., Flores-Pulido, L.: Síntesis óptima de un mecanismo plano para seguimiento de trayectoria utilizando evolución diferencial. In Computing Science.pp. 85-98 (2014)
- [7] Zapata-Zapata, M-F., Mezura-Montes, E., Portilla-Flores E-A.: Evolución diferencial con memoria de parámetros para la optimización de mecanismos de cuatro barras. In Computing Science.pp. 9-22 (2017)
- [8] Brest, J., Sepesy,M.M., Boskovič, B.: iL-SHADE: Improved L-SHADE Algorithm for Single Objective Real-Parameter Optimization. In: IEEE, F., Editor, S. (eds.) Congress on evolutionary Computation 2016, pp. 1188-1195.Vancouver, BC, Canada,{doi{10.1109/CEC.2016.7743922}}
- [9] Brest, J., Sepesy,M.M., Boskovič, B.: iL-SHADE: Improved L-SHADE Algorithm for Single Objective Real-Parameter Optimization. In: IEEE, F., Editor, S. (eds.) Congress on evolutionary Computation 2016, pp. 1188-1195.Vancouver, BC, Canada,{doi{10.1109/CEC.2016.7743922}}

## 7. Biografías



Noemí González León, trabaja como docente en el Instituto Tecnológico Superior de la Sierra de Norte de Puebla; Licenciada en Computación (UAEH, 1999), tiene una especialización en Sistemas y Planeación (UAEH, 1999). Tiene una Maestría en Dirección Escolar (CLAP, 2007). Estudió el Doctorado en Ciencias en Sistemas Computacionales y Electrónicos en (UATX, 2015- 2018), Ha desarrollado servicios para la industria (documentación para software de facturación electrónica para la industria hotelera), proyectos de investigación (Aplicaciones robóticas para procesos industriales, procesos de control inalámbrico nacional, sistema de riego, agua ionizada automática, sistema híbrido, instrucción poderosa), participa activamente como profesora en la División de Tecnologías y Sistemas de Información y es gestora de su Institución ante la industria de su región.



Leticia Flores Pulido nació en Puebla, México, y obtuvo su doctorado en Ciencias de la Computación el 29 de julio de 2011, Universidad de las Américas Puebla. Su maestría en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica en Ciencias Computacionales en Tonantzintla, Puebla, México el 13 de diciembre de 2001. Su Licenciatura se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en la Facultad de Ciencias Básicas Ingeniería y Tecnología. En Ingeniería Informática, generación 1992-1996. Su investigación se centra en el reconocimiento de patrones que involucran áreas de inteligencia artificial, particularmente la representación de información y aprendizaje automático en sistemas de recuperación de información visual. Sus contribuciones y publicaciones, incluyen: (1) Recuperación de información visual, (2) Transformada Wavelet, (3) Reconocimiento visual de patrones, (4) Modelado de datos, (5) Radial, (6) Reconocimiento de patrones en imágenes.

# Desarrollo de módulos para sistema de medición basado en un amplificador sincrónico digital a fase (LIA) implementado en una FPGA

J.A. Zarate Garcia<sup>1,a</sup>, J.H. Puebla Lomas<sup>1,b</sup>, J. F. Serrano Talamantes<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Ingeniería en Sistemas Computacionales

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo  
<sup>a</sup>[jazzy.sun220@gmail.com](mailto:jazzy.sun220@gmail.com), <sup>b</sup>[jpuebla@ipn.mx](mailto:jpuebla@ipn.mx), <sup>c</sup>[jfserranotal@gmail.com](mailto:jfserranotal@gmail.com)

**Resumen.-** Recientemente se demostró la posibilidad de implementar un amplificador sincrónico digital sensible a fase (LIA) [1],[2] y [3] utilizando un arreglo de compuertas programable en campo (FPGA) [4]. Es por ello y debido a las necesidades de las técnicas fototérmicas, las cuales se basan en el estudio de las variaciones de la transferencia de calor sobre diversos materiales, las cuales son medibles con dispositivos especializados en detección de amplitud y fase, se desarrolla este trabajo, complementando la programación del arreglo de compuertas programables en campo, además de implementar un sistema de mediciones intuitivo al usuario final.

Palabras Clave: Electrónica analógica, FPGA, Interface, Sistema y Procesamiento Digital de Señales.

## 1. Introducción

Las técnicas fototérmicas, permiten analizar diversos fenómenos de transporte de calor, y masa en materiales sólidos, líquidos y gases. El análisis de este tipo de fenómenos requiere de operaciones complejas, lo que involucra el uso de múltiples circuitos para el análisis y proceso de las señales medidas. Para llevar a cabo el análisis de la respuesta del material de estudio, es común utilizar un amplificador sincrónico o Lock-In Amplifier (LIA). Un LIA es un sistema que reduce el ancho de banda del ruido mediante una detección síncrona. En la figura 1 se observa el esquema de operación de un amplificador Lock-in. La señal de entrada  $V_{in}$  es una senoidal de frecuencia  $f_0$ . Esta señal es amplificada por un amplificador de instrumentación de ganancia  $A$ . Mediante un circuito PLL se genera una señal de referencia  $V_{ref}$  a la misma frecuencia  $f_0$ , con forma senoidal, triangular o cuadrada de dependiendo de la aplicación.

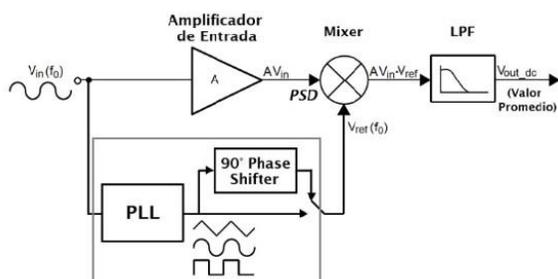


Figura 1. Esquema de operación de un Amplificador Lock-in[3]

Ambas señales se multiplican, el producto de estas señales se expresa como una serie de armónicos. Finalmente, la señal resultante es enviada a un filtro pasa bajas (LPF) que elimina las componentes armónicas de CA y permite extraer una contribución en DC ( $V_{out\ dc}$ ) proporcional a la señal de interés.

Para una señal de referencia cuadrada, el nivel de DC obtenido viene dado por la ecuación 1.

$$V_{out\_dc} = \left( \frac{2AV_{in}V_{ref}}{\pi} \right) \cos \theta \quad (1)$$

Los LIA son capaces de medir señales periódicas, de voltaje o de corriente, de amplitudes muy pequeñas (del orden de micros y nano voltios) y una alta selectividad de frecuencia permitiendo distinguir entre la señal de interés y el ruido de fondo [1][5].

Los LIA tienen la característica de ser demasiados costosos, voluminosos en cuanto al espacio que ocupan, y no siempre se utilizan todas sus funciones, lo cual provoca que el trabajo sea lento, ya que se pierde tiempo en adaptar el LIA al experimento.

Actualmente, existen propuestas de prototipos más portables que cumplen con dicha función y que reducen los problemas anteriormente mencionados, aunque algunos tienen un costo elevado y no son accesibles para los usuarios.

En Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA) del IPN, unidad Legarías se desarrolló un prototipo de LIA mucho más portable y accesible al usuario, dicho dispositivo es completamente funcional, en comparación con los LIA que existen, actualmente en el mercado u otros dispositivos similares, también dicho prototipo presenta una serie de áreas de oportunidad a optimizar.

El trabajo que se describirá a lo largo de este artículo, se centrará en abordar las áreas de oportunidad encontradas en el prototipo existente en CICATA unidad Legaría, una buena optimización de estos módulos nos ayudará a obtener un mejor dispositivo para sus laboratorios y atraer alumnos politécnicos que desarrollen este tipo de tecnologías no solo para el IPN sino para nuestro país.

## 2. Metodología.

Revisando diversas metodologías se propuso desarrollar nuestro trabajo terminal utilizando la metodología o modelo de desarrollo por prototipos debido a las características mencionadas en los siguientes puntos.

### 2.1 Modelo de desarrollo por prototipos propuesto.

El prototipo propuesto que conforma el LIA, se compondrá de tres módulos. Cada módulo del prototipo, proporcionará una función esencial para el funcionamiento del LIA.

Los módulos que conforman el prototipo propuesto son los siguientes:

- Módulo Filtro: El cual se encargará de acondicionar la señal de entrada, la cual se entregará lista para ser utilizada por el módulo de la FPGA.
- Módulo FPGA: Recibirá la señal acondicionada por el modulo del filtro y esperará instrucciones del módulo de la interfaz, para poner en funcionamiento sus tareas específicas.
- Modulo Interfaz: Se encargará de reconocer el módulo de la FPGA, por medio de un puerto de comunicación y enviará los datos necesarios para que el módulo de la FPGA comience su funcionamiento, para posteriormente mostrar los resultados obtenidos.

Por lo que la arquitectura general de nuestro sistema quedara descrita de la forma como lo muestra la figura 2.

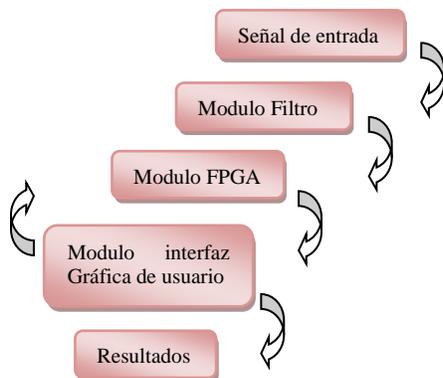


Figura 2. Diagrama a bloques del Sistema

## 3. Implementación Modulo Filtro

El filtrado se aplica en una señal cuya frecuencia dependerá del uso de las técnicas fototérmicas y mediante el circuito que se muestra en la figura 3.

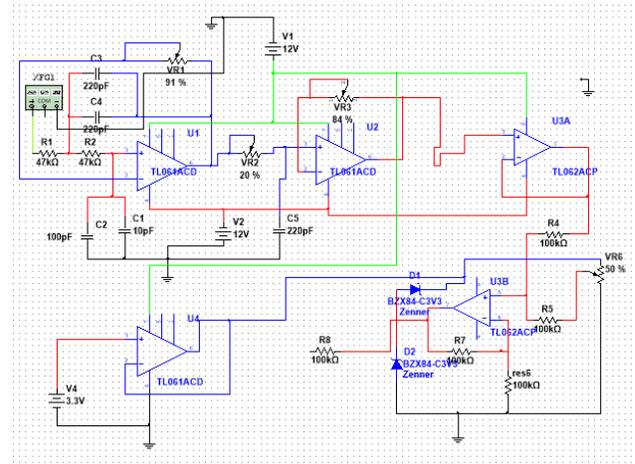


Figura 3. Esquematico del circuito representativo del filtro.

El acondicionamiento de la señal analógica es requerido para que el FPGA procese la señal, para que posteriormente esta sea demodulada y se puedan calcular la fase y la amplitud en la frecuencia seleccionada mediante la interfaz.

Para el modulo del filtro, se diseñó un filtro Butterworth de -60dB, se escogió este tipo de filtro porque su banda de paso, recibo una señal más plana, después de su frecuencia de corte, esta comienza a decaer en -3 dB.

Este tipo de filtro, fue un filtro Pasa Bajas, ya que las frecuencias que se están midiendo son menores a los 15 KHz, aunque con respecto a la frecuencia de la FPGA, esta se estableció a los 6Khz.

Además, la estructura que se utilizó para este filtro fue Sallen-Key, se escogió este tipo de estructura por su simplicidad y flexibilidad.

Este tipo de estructura permite que su diseño sea cómodo, y que si se requiere más etapas estas se conecten en cascada.

Aparte del filtro, se diseñó una etapa de OFFSET, la cual evita, que se reciban voltajes negativos, los cuales puedan llegar a ser perjudiciales para la FPGA.

Además, la conexión de la FPGA se realiza por medio de un seguidor de voltaje, para que el voltaje no se atenuara en el circuito.

### 3.1 Diseño del Filtro.

En la figura 2, se muestra el diseño del filtro que se utilizó para la obtención de la frecuencia de corte para sincronizarlo con la frecuencia del LIA.

Después de realizar las pruebas, se construyó el PCB para que se disminuyera el ruido externo, obteniendo el circuito mostrado en la figura 4.

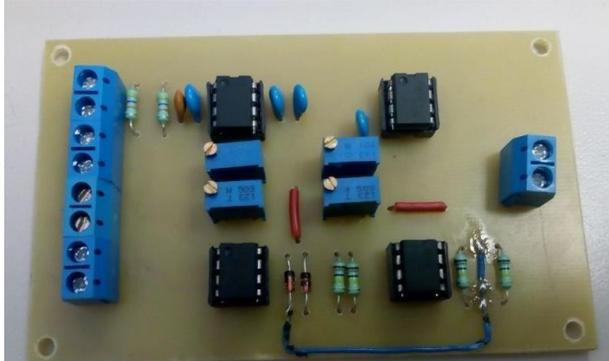


Figura 4. Placa del circuito de filtrado

### 3.2 Convertidor analógico-digital.

El CAD cuenta con dos canales de entrada conectados a la entrada de un amplificador cuya ganancia puede ser programada desde el FPGA.

Este amplificador escala la señal de entrada y utiliza una referencia de 1.65V. La señal escalada entra al convertidor analógico digital, que la convierte en una señal digital de 14 bits en CA2.

Con la Ecuación 2 se calcula el valor en CA2 a partir del voltaje de entrada.

$$CA2 = Gain * \frac{V_{in} - 1.65V}{1.25V} * 8192 \quad (2)$$

Tanto el amplificador como el CAD, utilizan un bus serial para la comunicación con el FPGA, en la figura 5 se muestra el diagrama de temporización.

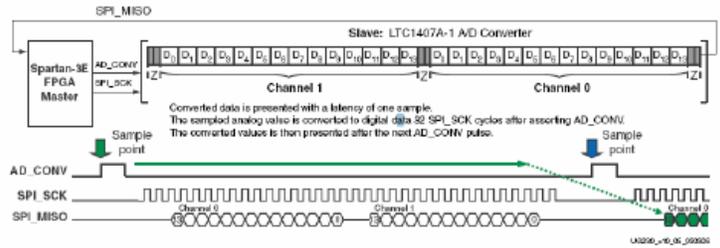


Figura 5. Temporización del circuito de captura analógica[3]

### 3.3 Convertidor digital-analógico.

El CDA cuenta con cuatro canales de salida independientes, ver figura 6.

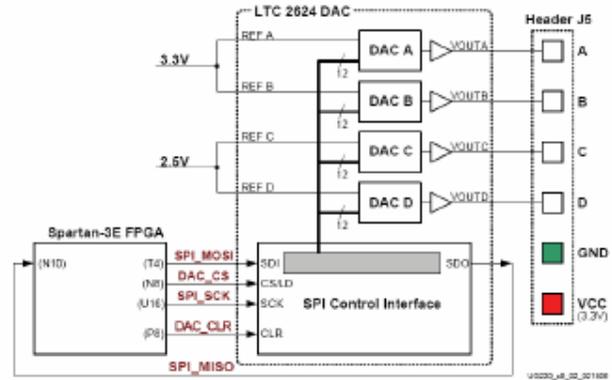


Figura 6. Diagrama del convertidor digital-analógico [3]

El valor de voltaje obtenido en la salida depende del voltaje de referencia y el dato enviado y se calcula como se indica en la ecuación 3.

$$V_{out} = \frac{D}{4096} * V_{ref} \quad (3)$$

Donde D indica el puerto de salida del voltaje, considerando el voltaje de referencia.

### 4. Modulo de Interfaz Gráfica.

El desarrollo de nuestro modulo la interfaz gráfica, se desarrolló en el lenguaje de programación JAVA, con ayuda del IDE NetBeans. Ya que como objetivos principales de este desarrollo es ofrecerle una interfaz de uso libre a nuestro usuario final, por ello del desarrollo en dicha plataforma.

Las pantallas principales de nuestro desarrollo quedaron descritas por las figuras 7 y 8.

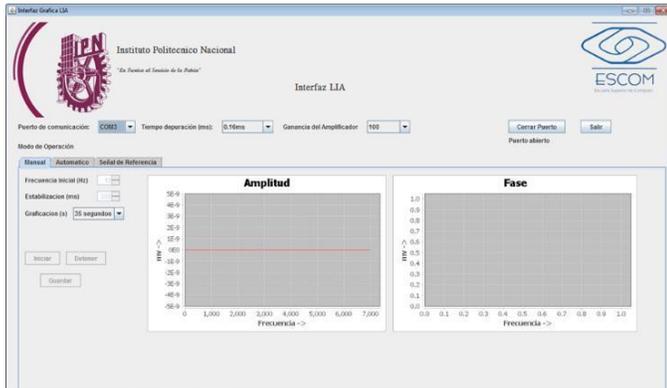


Figura 7. Interfaz manual del Sistema

El modo de operación manual se puede ver en la imagen anterior, para el modo de operación automático se llenan los campos que describe la imagen a continuación.

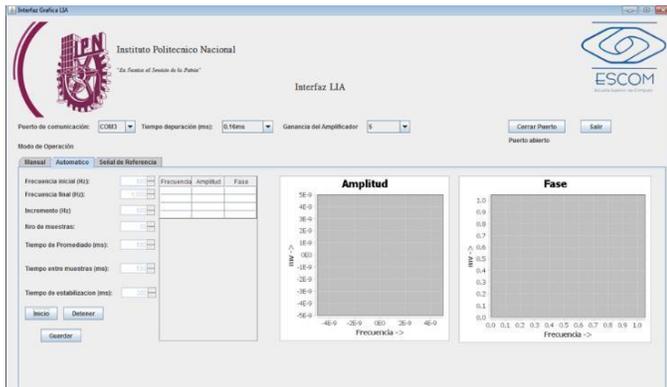


Figura 8. Interfaz automática del sistema.

Se tiene un modo de operación extra, el cual nos muestra las opciones de configuración con los que cuenta nuestro módulo FPGA, lo que nos permite visualizar estas opciones desde nuestra interfaz gráfica.

En la figura 9 se muestra la interfaz para graficar tanto el espectro de amplitud como el de fase para poder observar el comportamiento del sistema.

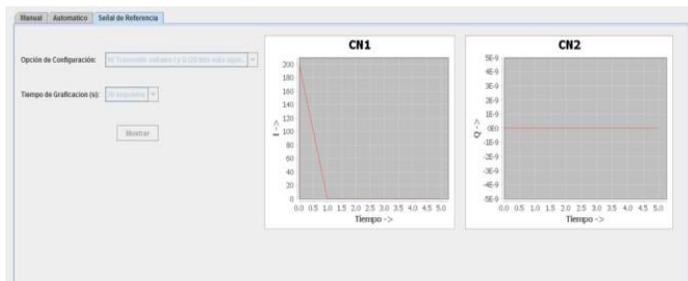


Figura 9. Interfaz espectro de amplitud y fase.

Para tener una óptima comunicación entre nuestros módulos FPGA e interfaz gráfica JAVA nos ofreció la facilidad de establecer la comunicación con ayuda de Giovynet Driver ya que faculta a Java, para interfazar circuitos electrónicos y/o circuitos electromecánicos desde un ordenador.

Lo que, en consecuencia, convierte a JAVA en una opción para el fabricante de hardware que desea comunicar sus creaciones con un PC. Giovynet Driver soporta el envío y recepción de datos a través del puerto serie, mediante una serie de métodos de la clase `giovynet.serial.Com`.

Para llevar a cabo el envío y recepción de datos utilizamos los métodos que nos ofrece Giovynet, en el caso del envío fue:

- `sendSingleData(overloaded)` : void Este método es usado para enviar un elemento de tipo char, o de tipo String o de tipo Hex. El elemento se enviará transcurrido el tiempo determinado en el método `setMinDelayWrite( int milisegundos)` de la clase `giovynet.serial.Parameters`, por "default" el tiempo establecido para Windows es 0 milisegundos, y para Linux es de 10 milisegundos [3],[5].

Para la recepción de datos utilizamos el siguiente método:

- Método `receivesSingleCharAsInteger()` : int Este método es usado para recibir un dato ASCII en representación entera, luego del tiempo establecido por el método `setMinDelayWrite(int milisegundos)`, de la clase `giovynet.serial.Parameters`, por "default" el tiempo establecido para Windows es 0 milisegundos, y para Linux es de 10 milisegundos. Este método es recomendado para recibir caracteres de control tales como, `<ACK>`, `<NACK>`, `<LF>`,...etc.

## 5. Implementación de la comunicación serial en la interfaz gráfica JAVA.

Para establecer una comunicación entre nuestro módulo de la FPGA e Interfaz Gráfica se implementó la clase llamada `FPGAConnection` la cual nos permite visualizar los puertos disponibles en nuestra PC, Primero se instancia un objeto de tipo `giovynet.nativelink.SerialPort`, seguidamente se utiliza el método `getFreeSerialPort()` para obtener una lista String de puertos libres para comunicar la interfaz:

```
Public void FPGAConnection() (
    Try (
        SerialPort puerto = new SerialPort();
        List<String> lista Puertos= puerto.getFreeSerialPort();
        //Tiempo de estabilización de la señal
        List<String> listatiempo = null;
```

```

if (listaPuertos.isEmpty()) {
    throw new Exception("Lista Vacía");
}
for (int x= 0; x<listaPuertos.size(); x++) {
    ElijoP.addItem(listaPuertos.get(x));
}
} catch (Exception ex) {
    System.err.println("Error no se encontró ningún puerto
    Disponible");
    ElijoP.addItem("Vacío");
    abrirpuerto.setEnabled(false);
    Finalizar.setEnabled(true);
}
}

```

Para la apertura del puerto serial seleccionado se implementó el botón Abrir Puerto en el cual se establece la configuración del puerto seleccionado. Para configurar el puerto serie primero se crea un objeto de tipo `giovinet.serial.Parameter`, ya que cambiamos los parámetros por "default", se utilizó los métodos `set` del objeto `parameter`, antes de instanciar la clase `giovinet.serial.Com` [3],[5].

De igual forma se utilizan los métodos `sedSingleData` y `RecibeSingleData` los cuales permiten abrir o cerrar el puerto de comunicación con la tarjeta enviando los comandos en ASCII que establecen la comunicación con la FPGA. Según lo establecido en los Módulos de la FPGA, los comandos que se enviarán para comenzar la Operación de la FPGA o cambio de configuración son los siguientes descritos en la tabla [1]:

Tabla 1. Comandos de la FPGA

Comando ASCII	Descripción
P	Detener Transmisión
S	Comenzar transmisión continua
E	Habilita oscilador interno
D	Deshabilita Oscilador interno
*	Numero de 32 bits proporcional <code>frec.operacion</code>
#	Cambia la opción de configuración, seguido de Un número de 8 bits.

### 5.1. Descripción de comandos ASCII para control de la FPGA.

Entonces la función de nuestro botón Abrir Puerto mediante los métodos `sedSingleData` y `RecibeSingleData` envía los caracteres de control S y E respectivamente lo que nos permite realizar las tareas que se describieron en la tabla.

### 6. Conclusiones.

En la parte del filtrado, se logró realizar adecuadamente esta etapa de filtrado y acondicionamiento de la señal para que esta se reciba en la FPGA, y no cause ningún conflicto, ya que, al ser una tarjeta delicada, esta tiene que tener ciertos

requerimientos para no causar ningún daño. Ya con esta etapa realizada, se realizó el diseño y después la impresión del circuito en PCB, para la disminución de algún otro ruido externo, además, se estableció la comunicación entre la FPGA y la interfaz gráfica por medio del puerto serial, lo cual, permitió que se enviara y recibieran los datos adecuadamente por parte de la interfaz gráfica.

Esta misma esta adecuada para el estudio de las técnicas foto térmicas, y que el usuario, fuera más fácil de utilizarla, sin la necesidad que se cuente con el desarrollador o con alguna otra persona. Además, se añadió una función extra a la interfaz gráfica, la cual no estaba en los objetivos, por solicitud del personal del laboratorio, esta función, permite que se muestre cual es la señal que se está recibiendo de la FPGA.

Además gracias al diseño en la FPGA de uno de los módulos que emplea el Lock-In Amplifier físico, se logro optimizar las características que tiene el LIA.

### 7. Referencias.

- [1] C. A., "Implementación de un amplificador sincrónico digital (Lock-In) usando un dispositivo FPGA (Field Programmable Gate Array)" Tesis de Maestría, CICATA, Legaria, -IPN, México, 2013.
- [2] A. Cifuentes y E. Marín, Implementation of a Field Programmable Gate Array-based Lock-in Amplifier. Measurement, México, 2015. M.E. y R. Ivanov, E. Marín y R. Ivanov "LIA in a Nut Shell: How can trigonometry help to understand Lock- In Amplifier Operation", México: Latin American Journal of Physics Education, 2009.
- [3] «Xilinx Inc., Spartan-3E FPGA Family Data Sheet,» 2012. [En línea]. Available: [http://www.xilinx.com/support/documentation/data\\_sheets/ds312.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf).
- [4] B. G., "Unidad en Arquitectura FPGA modular y acoplable a sistemas científicos y tecnológicos que requieren análisis de fase y amplitud", Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, México,
- [5] R. R. Abbiati y A. Geraci , Abbiati and A. Geraci, "Digital field programmable gate array-based lock-in amplifier for high-performance photon counting applications", Rev. Sci. Inst 76, 2005.

### 8. Biografías

Jazmín Araceli Zarate García, Ingeniero en Sistemas Computacionales de la ESCOM, Desarrollador de Sistemas Computacionales.

José Félix Serrano Talamantes, Profesor-Investigador en Reconocimiento de Patrones del CIDETEC-IPN.

Jaime Hugo Puebla Lomas, Profesor-Investigador en Sistemas Computacionales de la ESCOM-IPN.

# Búsqueda de Cadenas en Textos Usando Árboles de Decisión

S. González<sup>1,a</sup>, J. Ruiz<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Depto. de Ciencias Computacionales

<sup>a</sup> [ser08c@cenidet.edu.mx](mailto:ser08c@cenidet.edu.mx), <sup>b</sup> [josera@cenidet.edu.mx](mailto:josera@cenidet.edu.mx)

**Resumen**— Se presenta un algoritmo para detectar de forma simultánea múltiples cadenas en textos largos, el cual utiliza árboles de decisión. Se compara su eficiencia con la de otros algoritmos de búsqueda de cadenas, para los casos de letras que representan información genética y para texto en general. Los experimentos demuestran que los árboles de decisión no son prácticos para detectar o buscar cadenas largas, pero presentan una interesante alternativa en textos cortos (menos de 8 letras), si no se tiene en cuenta el costo de la generación de los árboles de decisión.

*Palabras clave.* Búsqueda de cadenas, Árboles de Decisión, ID3, Bioinformática, Comodines.

## 1. Introducción

En este trabajo se denomina “cadena” a la secuencia de caracteres o letras que se busca, y “texto” a la secuencia de caracteres o letras en la que se realiza la búsqueda.

La búsqueda de cadenas en textos es una operación básica, y cuando se realiza en textos largos la eficiencia cobra especial importancia. Las últimas mejoras en estos algoritmos son en usar búsquedas predictivas [1] y en aprovechar los procesadores gráficos o GPU de las computadoras [2]. En algunos casos, la lectura de elementos de textos puede ser costosa, por ejemplo, cuando los textos están almacenados en medios relativamente lentos o cuando las letras representan a vectores de características y su identificación es costosa, razón por la cual en este trabajo se utiliza como medida de costo la cantidad de accesos a las letras del texto.

La búsqueda puede ser de una cadena, como el algoritmo Boyer-Moore [3] y el Knuth–Morris–Pratt [4], que usan tablas de desplazamiento para saltar porciones del texto en la búsqueda. También puede ser de varias cadenas de forma simultánea, como el algoritmo de Aho-Corasick [5], que usa autómatas finitos deterministas (AFD), los que mezclan las ideas de los AFD y las tablas de desplazamiento [6][7][8]; los algoritmos que realizan búsquedas aproximadas [9][10]; los algoritmos que preprocesan [11] y los que indexan [12][13] al texto para acelerar múltiples búsquedas posteriores, entre otros.

La bioinformática [14] también utiliza algoritmos de búsqueda de cadenas, ya que los nucleótidos del ácido desoxirribonucleico (ADN), Adenina, Timina, Guanina y Citosina, se representan con las letras A, T, G y C respectivamente, y el ADN se puede representar con un texto largo formado por esas letras.

Los nucleótidos en el ADN sufren algunos cambios o mutaciones, entre ellos están los reemplazos, inserciones y supresiones, lo cual crea variantes a una secuencia de nucleótidos, por lo que en bioinformática es útil la búsqueda simultánea de varias cadenas.

Por otro lado, los árboles de decisión permiten clasificar objetos, y existen algoritmos para generarlos automáticamente usando colecciones de objetos, como el ID3 [15].

En este documento se explora utilizar árboles de decisión para clasificar segmentos de texto en la clase que contienen a una colección de cadenas, y la clase que no las contienen, lo que resulta en un algoritmo para detectar o buscar múltiples cadenas simultáneamente en el texto, con la expectativa de que realice una menor cantidad de accesos al texto que otros algoritmos. Una posible ventaja de usar árboles de decisión es que se pueden paralelizar, ya que cada segmento se puede procesar en paralelo, además de que aprenden de forma natural las peculiaridades de las cadenas usadas en su generación o entrenamiento. El algoritmo resultante se compara con otros tres algoritmos populares en la literatura con respecto al número de accesos que realizan en el texto.

## 2. Algoritmo de detección de cadenas usando árboles de decisión

Un árbol de decisión clasifica un objeto representado con un conjunto de atributos. En este caso el objeto es un segmento de texto, es decir, una porción del texto completo, y sus atributos son las letras. El tamaño del segmento es cuando menos el tamaño de la cadena más grande a buscar, sin un valor máximo, pero mientras más grande sea el segmento más grande es el árbol de decisión. Además, los segmentos se intersecan para garantizar que una copia completa de la cadena se encuentre en un segmento. Los segmentos y su solapamiento se representan en la Fig. 1.

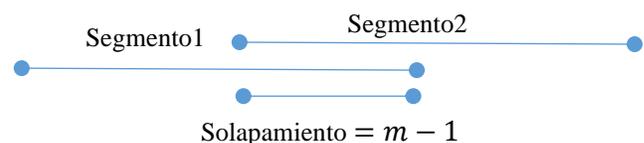


Fig. 1. División de un texto en segmentos, donde “ $m$ ” es el tamaño de la cadena más larga

Cuando el texto no se pueda dividir en un número entero de segmentos, se pueden elegir varias estrategias: insertar una letra de relleno hasta completar el segmento, solapar en más de “ $m - 1$ ” letras al último segmento con el penúltimo, entrenar árboles de decisión para diferentes tamaños de segmento, o utilizar otro algoritmo para el último segmento. La opción elegida es solapar al último segmento en más de “ $m - 1$ ” letras. La cadena se busca en cada segmento de forma consecutiva, es decir, primero en el segmento inicial, después en el siguiente, y así sucesivamente.

### A. Entrenamiento del árbol de decisión

El árbol de decisión se entrena con el algoritmo ID3, y el conjunto de datos se obtiene poniendo las cadenas que se buscan en todas las posiciones posibles dentro del segmento y rellenando las letras restantes con todas las combinaciones posibles.

Un aspecto importante en el algoritmo es la generación del alfabeto reducido, el cual consta de todas las letras diferentes usadas en las cadenas a buscar, y en caso de que no sean todas las letras diferentes posibles en el texto (el alfabeto completo), una letra “diferente”, representada con un “\_”, se agrega al alfabeto reducido.

Por ejemplo, si la cadena a buscar es “AA”, y el alfabeto completo es {A,G,T,C}, entonces el alfabeto reducido es {A,\_}, donde el símbolo “\_” representa a cualquiera opción que no sea “A”, es decir, “G”, “T” y “C”, y el conjunto de entrenamiento y el árbol de decisión sólo utilizan el alfabeto reducido.

Un paso intermedio para generar las cadenas de entrenamiento es usar comodines, donde un comodín representa a todas las letras posibles, y se representa con un “\*”.

Por ejemplo, si para el alfabeto anterior la cadena a buscar es “AA” y el tamaño del segmento es 3, entonces el conjunto de entrenamiento queda:

AA\*|1  
\*AA|1  
\*\*\_|0

Donde el símbolo “|” separa a la plantilla (lado izquierdo) de su clase (lado derecho). Además, el alfabeto reducido queda {A,\_}.

Para traducir estas plantillas a casos de entrenamiento, se reemplazan los comodines por todos los valores que puedan tomar, incluyendo “\_”. Al realizar el reemplazo, se descartan aquellos casos que ya estén incluidos en las plantillas previas, ya que se trata de una lista ordenada. La Tabla I indica los

reemplazos para el ejemplo anterior. La letra cursiva indica los casos que se descartan por estar ya incluidos previamente (sin tomar en cuenta su clase).

TABLA I. EJEMPLO DE REEMPLAZO DE OBJETOS CON COMODINES A OBJETOS SIMPLES

AA* 1	AAA 1 AA_ 1
*AA 1	<i>AAA 1</i> _AA 1
*** 0	<i>AAA 0</i> <i>_AA 0</i> <i>AA_ 0</i> _A_ 0 A_A 0 _ _A 0 A_ _ 0 _ _ _ 0

Después de reemplazar los comodines y descartar los repetidos, el conjunto de entrenamiento para el ejemplo anterior queda:

{AAA|1 , AA\_|1 , \_AA|1 , A\_A|0 , A\_ \_|0 , \_A\_|0 , \_ \_A|0 , \_ \_ \_|0}.

El proceso se repite para cada cadena que se busca de forma simultánea. Si se desea además diferenciar las cadenas encontradas, a cada una de ellas se le puede poner una clase distinta, pero hay que tener en cuenta que: si hay más de una cadena en el segmento, la clase encontrada será sólo la clase correspondiente a una de ellas, y se ignorarán las demás.

### 3. Metodología

Se generaron aleatoriamente textos de 1000 letras para buscar en ellos, y cadenas de tamaños 4, 6 y 8 letras para buscarlas en el texto. Se puso una de las cadenas generadas al final del texto para que siempre fuera encontrada. El proceso anterior se realizó con dos alfabetos, uno de 4 letras y otro de 27.

Debido a que los árboles de decisión necesitan operar con segmentos de texto de tamaño fijo, se dividió el texto en segmentos de tamaños relativos de 1 hasta 3 veces el tamaño de la cadena a buscar. Se entrenaron los árboles de decisión y se realizaron las búsquedas. Se eligió el tamaño relativo del segmento que produce una menor cantidad promedio de accesos y un segmento más pequeño, ya que mientras más grande el segmento más costoso el entrenamiento del árbol de decisión. Este tamaño relativo es que se utiliza en las siguientes comparaciones.

Se comparó la cantidad de accesos promedio del algoritmo desarrollado con los siguientes algoritmos de búsqueda de cadena:

- Boyer-Moore [3], que busca una sola cadena en un texto y realiza desplazamientos para acelerar la búsqueda. El

código del algoritmo [16] se modificó para incrementar un contador en cada acceso a una letra del texto.

- Aho-Corasick [5], que usa AFD y busca múltiples cadenas simultáneamente. El AFD se puede realizar a mano o con un compilador [17].
- Wu-Manber [7], que busca múltiples cadenas simultáneamente, realiza desplazamientos para acelerar la búsqueda, y utiliza funciones hash con las letras. El código del algoritmo [18] se modificó para incrementar un contador cada que se usa una letra del texto en las funciones hash, cada que se comparan los códigos hash, y cada que se comparan las letras restantes una vez que se encuentran códigos hash coincidentes.

Como el algoritmo Boyer-Moore sólo busca una cadena a la vez, las pruebas se dividieron en dos lotes: en uno se generó una cadena aleatoria para buscar en el texto, y en el otro se realizaron 2 mutaciones a la cadena aleatoria generándose así 3 cadenas para buscar de forma simultánea. En el primer lote se incluye al algoritmo Boyer-Moore en la comparación, en el segundo se descarta.

Se realizaron 100 pruebas para cada combinación, y se promediaron los resultados.

#### 4. Resultados

La Fig. 2 muestra cómo se comporta la cantidad de accesos con respecto a la longitud del segmento, para un alfabeto de 4 letras y la búsqueda de una cadena. Se obtuvo generando 100 textos aleatorios con sus respectivas 100 cadenas a buscar, contando cuantos accesos a las letras del texto se realizaron, y dividiendo ese valor entre la posición de la cadena en el texto (eje vertical), eso para cada longitud de segmento (eje horizontal), desde la misma longitud de la cadena hasta casi tres veces ese valor, dividido entre la longitud de la cadena. Las longitudes de cadena usadas son de 4, 6 y 8 letras, y cada caso genera un trazo en la Fig. 2. Sus ejes vertical y horizontal se ilustran con las ecuaciones 1 y 2 respectivamente.

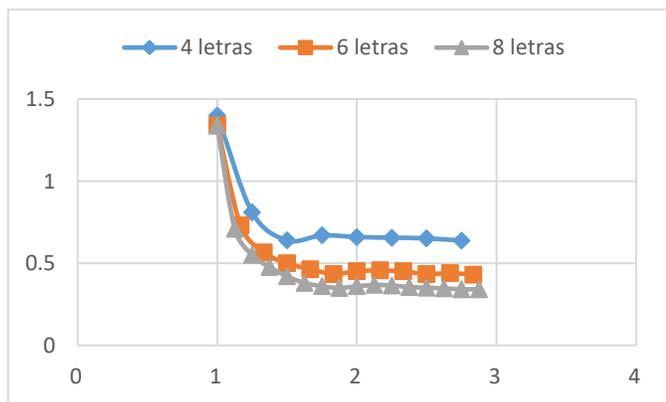


Fig. 2. Promedio de comparaciones ponderadas con respecto a la longitud relativa del segmento, para alfabeto de 4 letras y una cadena.

$$\overline{T}_k = \frac{\sum a_i/p_i}{n} \quad (1)$$

Donde “ $a_i$ ” es la cantidad de accesos de la  $i$ -ésima búsqueda, “ $p_i$ ” es la posición de la cadena en esa búsqueda, “ $n$ ” es la cantidad de búsquedas (100), y “ $\overline{T}_k$ ” es el costo promedio para la longitud relativa de segmento “ $l$ ”.

$$k = \frac{l}{m} \quad (2)$$

Donde “ $l$ ” es la longitud del segmento, “ $m$ ” es longitud de la cadena, y “ $k$ ” es la longitud relativa del segmento.

De la misma manera, la Fig. 3 grafica el costo ponderado promedio (1) con respecto a la longitud relativa del segmento (2), para el caso de búsquedas simultáneas de tres cadenas de la misma longitud (4, 6 y 8 letras) y un alfabeto de 4 letras.

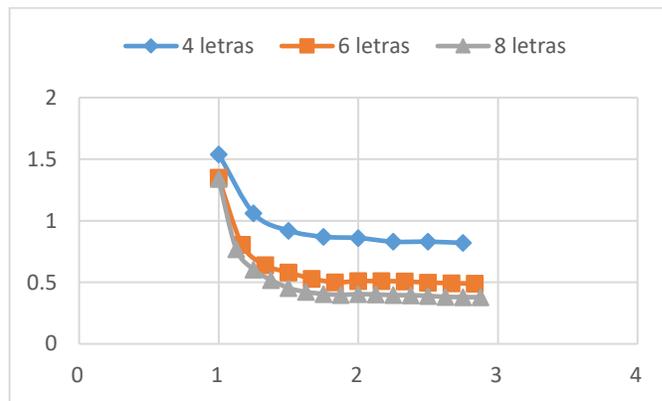


Fig. 3. Promedio de comparaciones ponderadas con respecto a la longitud relativa del segmento, para alfabeto de 4 letras y tres cadenas simultáneas.

Con el alfabeto de 27 letras, la cantidad de datos para entrenar los árboles de decisión empezaron a crecer demasiado, más de lo que variables de 64 bits pueden almacenar, por lo que no se realizaron las pruebas para todos los casos. Las pruebas realizadas se muestran en la Fig. 4, en donde se grafican al mismo tiempo todas las longitudes de cadena y cantidad de cadenas simultáneas (una y tres).

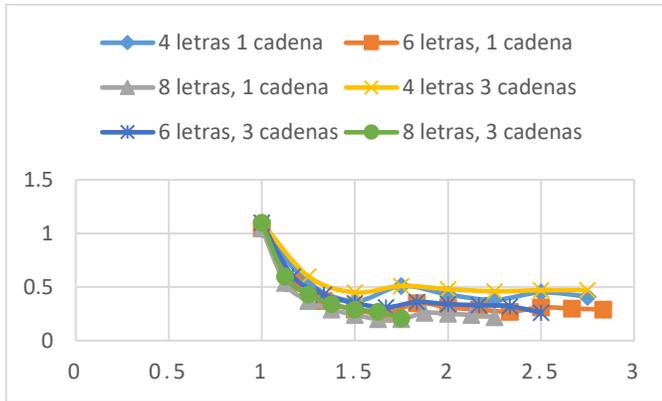


Fig. 4. Promedio de comparaciones ponderadas con respecto a la longitud relativa del segmento, para un alfabeto de 27 letras.

Para comprender las limitantes, se observa que: para direcciones de memoria de 64 bits, la cantidad de objetos de entrenamiento no puede alcanzar  $2^{64}$ , y por lo tanto la longitud máxima del segmento está dada por la ecuación 3, y para direcciones de memoria de 64 bits y un alfabeto de 4 letras el máximo posible es de 32 letras.

$$l_{max} \leq \frac{s}{\log_2(\|\Sigma\|)} \quad (3)$$

Donde “ $l_{max}$ ” es la longitud máxima del segmento, “ $s$ ” es la cantidad de bits en las direcciones de memoria, y “ $\|\Sigma\|$ ” es la cantidad de letras en el alfabeto reducido.

Otro aspecto a tener en cuenta es el tamaño del árbol de decisión, que tiene una altura de la longitud del segmento “ $l$ ” y un máximo de “ $\|\Sigma\|$ ” hijos por cada nodo, i.e., crece proporcionalmente como indica la ecuación 4.

$$\|\text{nodos}\| \approx l^{\|\Sigma\|} \quad (4)$$

Donde “ $\|\text{nodos}\|$ ” es la cantidad de nodos del árbol de decisión, “ $l$ ” es la longitud del segmento, y “ $\|\Sigma\|$ ” es la cantidad de letras en el alfabeto reducido.

En las figuras anteriores se observa que para tamaños ligeramente inferiores a dos veces el tamaño de la cadena a buscar ( $2m$ ) se obtiene una buena eficiencia, y la mejora para segmentos mayores a “ $2m$ ” es muy poca, por lo que para comparar el algoritmo propuesto con otros de la literatura se toma el tamaño de segmento de “ $2m - 2$ ”.

La Tabla II compara los algoritmos para el caso de un alfabeto de 4 letras y la búsqueda de una sola cadena a la vez. Los algoritmos comparados son el que usa el árbol de decisión (AD), Aho-Corasick (AC), Wu-Manber (WM) y Boyer-Moore (BM).

TABLA II. PROMEDIOS PONDERADOS DE LA CANTIDAD DE ACCESOS PARA LA BÚSQUEDA DE UNA CADENA CON ALFABETOS DE CUATRO LETRAS

$m$	AD	AC	WM	BM
4	0.64	1	1.7	0.59
6	0.46	1	0.82	0.41
8	0.36	1	0.55	0.36

La Tabla III compara los algoritmos para el caso de un alfabeto de 4 letras y la búsqueda de tres cadenas simultáneas.

TABLA III. PROMEDIOS PONDERADOS DE LA CANTIDAD DE ACCESOS PARA LA BÚSQUEDA DE TRES CADENAS SIMULTÁNEAS CON ALFABETOS DE CUATRO LETRAS

$m$	AD	AC	WM
4	0.92	1	2.2
6	0.53	1	0.89
8	0.41	1	0.59

De la misma manera, las tablas IV y V muestran la búsqueda de una y de tres cadenas simultáneas para un alfabeto de 27 letras.

TABLA IV. PROMEDIOS PONDERADOS DE LA CANTIDAD DE ACCESOS PARA LA BÚSQUEDA DE UNA CADENA CON ALFABETOS DE 27 LETRAS

$m$	AD	AC	WM	BM
4	0.37	1	1.51	0.29
6	0.25	1	0.76	0.20
8	0.2	1	0.51	0.16

TABLA V. PROMEDIOS PONDERADOS DE LA CANTIDAD DE ACCESOS PARA LA BÚSQUEDA DE TRES CADENAS SIMULTÁNEAS CON ALFABETOS DE 27 LETRAS

$m$	AD	AC	WM
4	0.45	1	1.5
6	0.31	1	0.76
8	0.21	1	0.51

En las tablas II a V se observa que el algoritmo Aho-Corasick siempre realiza un acceso a cada letra hasta encontrar la cadena que se busca, esto por la forma de operar de los AFD, que leen todos los caracteres de forma secuencial y van cambiando de estado interno hasta llegar a un estado de aceptación o rechazo.

Es importante anotar que: aunque la cantidad de accesos del algoritmo Wu-Manber es relativamente alta, el algoritmo usa las letras internamente para sus funciones hash, lo cual, si el acceso a las letras del texto es eficiente, por ejemplo, si se usa una memoria *caché*, mantiene al algoritmo veloz, y es más eficiente conforme las cadenas se van haciendo más largas.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un algoritmo basado en árboles de decisión para detectar cadenas en textos largos, el cual tiene la propiedad de que utiliza el aprendizaje automático para optimizar la búsqueda de cadenas, en vez de utilizar un algoritmo de propósito específico. Tiene la particularidad de que analiza cada segmento de forma independiente, lo cual podría favorecer una paralelización en un trabajo futuro.

Se comparó el algoritmo propuesto con otros tres de la literatura, mostrando resultados competitivos para cadenas cortas (menos de 8 letras) y alfabetos pequeños, esto porque en las pruebas el algoritmo con árboles de decisión obtuvo resultados más competitivos con un alfabeto de 4 letras que con un alfabeto de 27, y alcanzó tamaños prohibitivos en la cantidad de casos de entrenamiento con cadenas largas. La cantidad de casos de entrenamiento crece exponencialmente con respecto a la cantidad de letras del segmento.

El uso de los árboles de decisión presenta las desventajas del tamaño del árbol y del costo de su generación o entrenamiento, sin los cuales sería una opción competitiva en la búsqueda de cadenas cortas, pues como se observa en los experimentos, la cantidad de accesos resulta competitiva a partir de segmentos una letra más grandes que la cadena a buscar.

Como trabajo futuro se pretende aumentar la longitud máxima de cadenas admisibles con el algoritmo propuesto, y compararlo con algoritmos usados para búsqueda de cadenas en bioinformática, como Blast [19] para cadenas individuales, y Clustal [20] para cadenas múltiples.

## 6. Referencias

- [1] Gurung, D., Chakraborty, U. K., & Sharma, P. (2016). Intelligent Predictive String Search Algorithm. *Procedia Computer Science*, 79, 161-169.
- [2] Ramos-Frías, R., & Vargas-Lombardo, M. (2017). A Review of String Matching Algorithms and Recent Implementations using GPU.
- [3] Boyer, R. S., & Moore, J. S. (1977). A fast string searching algorithm. *Communications of the ACM*, 20(10), 762-772.
- [4] Knuth, Donald; Morris, James H.; Pratt, Vaughan (1977). "Fast pattern matching in strings". *SIAM Journal on Computing*. 6 (2): 323–350. CiteSeerX 10.1.1.93.8147. doi:10.1137/0206024.
- [5] Aho, A. and Corasick, M. (1975) "Efficient string matching: an aid to bibliographic search," *Commun. ACM*, vol. 18, no. 6, pp. 333–340.
- [6] Commentz-Walter, Beate (1979). A String Matching Algorithm Fast on the Average. *International Colloquium on Automata, Languages and Programming*. LNCS. 71. Graz, Austria: Springer. pp. 118–132. doi:10.1007/3-540-09510-1\_10. ISBN 3-540-09510-1.
- [7] Wu, S., & Manber, U. (1994). A fast algorithm for multi-pattern searching. Tech. R. TR-94-17, Dept. of Comp. Science, Univ of Arizona.
- [8] Crochemore, M., Czumaj, A., Gasieniec, L., Lecroq, T., Plandowski, W., & Rytter, W. (1999). Fast practical multi-pattern matching. *Information Processing Letters*, 71(3-4), 107-113.
- [9] Navarro, G. (1998). *Approximate text searching* (Doctoral dissertation, PhD thesis, Dept. of Computer Science, Univ. of Chile).
- [10] Fulwider, S., & Mukherjee, A. (2010). Multiple pattern matching. In *The Second International Conferences on Pervasive Patterns and Applications, PATTERNS* (pp. 78-83).
- [11] Kim, S., & Kim, Y. (1999, August). A fast multiple string-pattern matching algorithm. In *Proceedings of 17th AoM/IAoM Conference on Computer Science* (pp. 44-49).
- [12] Navarro, G., Baeza-Yates, R. A., Sutinen, E., & Tarhio, J. (2001). Indexing methods for approximate string matching. *IEEE Data Eng. Bull.*, 24(4), 19-27.
- [13] Boytsov, L. (2011). Indexing methods for approximate dictionary searching: Comparative analysis. *Journal of Experimental Algorithmics (JEA)*, 16, 1-1.
- [14] Bajic, V. B., et al. (2003). «From informatics to bioinformatics». *Proceedings of the first Asia-Pacific bioinformatics conference on bioinformatics, Adelaide*.
- [15] Quinlan, J. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning I*. 81–106.
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/Boyer%E2%80%93Moore\\_string\\_search\\_algorithm](https://en.wikipedia.org/wiki/Boyer%E2%80%93Moore_string_search_algorithm). Consultado en 2019.
- [17] <https://github.com/westes/flex/>. Consultado en 2019.
- [18] <http://blog.raymond.burkholder.net/index.php/?archives/362-C++-Implementation-of-Wu-Manbers-Multi-Pattern-Search-Algorithm.html>. Consultado en 2019.
- [19] Kent, W. J. (2002). BLAT—the BLAST-like alignment tool. *Genome research*, 12(4), 656-664.
- [20] Sievers, F., & Higgins, D. G. (2014). Clustal Omega, accurate alignment of very large numbers of sequences. In *Multiple sequence alignment methods* (pp. 105-116). Humana Press, Totowa, NJ.

## 7. Biografías

**Sergio Alejandro González Segura.** Ingeniero en Sistemas Computacionales (1997), Instituto Tecnológico de Mérida. Maestro en Ciencias en Ciencias de la Computación (2011), Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico en 2011. Estudiante de Doctorado en Ciencias Computacionales desde 2016.

**José Ruiz Ascencio.** Físico (1971), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. Master of Science in Electrical Engineering (1973) de Stanford Leland Jr. University, California, E.U.A. Doctor en Ciencias(1989) de University of Sussex, Sussex, Inglaterra, G.B.

# Diseño de una Gramática Libre de Contexto para la Identificación de Enunciados Prohibitivos en el Código Penal Federal

M. Sánchez<sup>1,a</sup>, L. F. Ríos<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería

<sup>a</sup> iram.sanzano@gmail.com, <sup>b</sup> rios.luisfrancisco@gmail.com

**Resumen**—En este trabajo se presenta el diseño de una gramática libre de contexto capaz de identificar enunciados normativos que se puedan clasificar como prohibitivos. Para lograrlo se analizó la estructura de varios artículos del Código Penal Federal, se obtuvo una gramática para una estructura común y se comparó manualmente su compatibilidad con otros artículos. Esta gramática es una de las formas en las que se puede realizar un etiquetado semántico de normas jurídicas, la cual puede ser útil como una herramienta para crear formas eficaces de obtener información jurídica relevante.

**Palabras clave.** Gramática Libre de Contexto, Lógica Deóntica, Informática Jurídica, Recuperación de Información.

## 1. Introducción

El Derecho es uno de los campos de conocimiento que cuenta con más volúmenes de información escrita. Día con día y cada vez más, códigos, leyes, normas, jurisprudencia, doctrina, tratados y reglamentos son reformados, derogados, expedidos o publicados a velocidades vertiginosas, lo que provoca una *inflación normativa* [1][2]. El problema se suscita cuando es necesario conocer todas las normas aplicables relevantes, ya sea a un caso específico o, en general, a una comunidad, y por el volumen, es imposible lograrlo a cabalidad, lo que ha ocasionado una «crisis de la información jurídica» [1].

La cuestión se agrava más aún si se considera que es deber y obligación de la población conocer el contenido normativo del sistema en que vive. Si bien, no se espera que todas las personas conozcan el contenido total del ordenamiento jurídico aplicable, empresa virtualmente imposible y por la que existe ayuda especializada de abogados y juristas, también es cierto que, como recita la máxima jurídica, “el desconocimiento de las leyes no exime de su incumplimiento”. Esto suscita una contrariedad, ya que por un lado es demasiada información jurídica, y por el otro no se disculpa su ignorancia. Adicionalmente, la abundancia de normas, sin una forma de obtener aquellas relevantes, limita el acceso a la justicia de la población, lo que puede ser contrario a los principios de certeza y seguridad jurídica [1].

Este problema aplica de igual forma al jurista promedio que, por más esmero que ponga en su estudio, sólo podrá abarcar una parte mínima del complejo de normas existentes.

Se han planteado varias soluciones tradicionales al respecto, desde la minimización de normas, hasta la

utilización de compendios [1]. Sin embargo, una de las propuestas más interesantes y novedosas es la utilización de la informática como forma de automatizar determinados procesos jurídicos. Entre los distintos campos aplicativos se encuentra el de la informática jurídica decisional, que busca ser una herramienta lógica de apoyo para los procesos legislativos y la decisión judicial; la informática jurídica de gestión, que sirve para la automatización de procesos o gestiones jurídicas o administrativas; y por último la informática jurídica documental, que busca métodos para automatizar la obtención y tratamiento de las fuentes de conocimiento jurídico [2].

Dentro de la informática jurídica documental existen diversas formas de tratar la información jurídica. En este trabajo se plantea la posibilidad de utilizar gramáticas libres de contexto como un primer paso para identificar la estructura de una norma jurídica prohibitiva, que posteriormente pueda ser utilizada para anotar y clasificar enunciados normativos, y así dar paso a su manejo informático. Para hacerlo se ha enfocado en obtener una estructura común de normas del Código Penal Federal, para su posterior clasificación deóntica como norma prohibitiva y clasificar sus compuestos.

## 2. Antecedentes

Desde los primeros años del nacimiento de la cibernética existió interés en sus posibles aplicaciones en el campo del Derecho [1]. Actualmente es un campo muy prometedor, donde ya existen soluciones comerciales para necesidades concretas, sobre todo en jurisdicciones como la estadounidense con el sistema de Inteligencia Artificial Ross Intelligence para búsquedas y resolución de consultas legales, o vastos compendios digitales de legislación y jurisprudencia estructurados y anotados como Westlaw o LexisNexis .

Una de las formas de utilización de herramientas tecnológicas más difundidas es el marcado de texto con un lenguaje de marcas como xml [3]. Estas herramientas permiten un acceso libre a la información, realizan una estructuración del texto, y además aportan la ventaja de ser legibles por una máquina, entre otros beneficios [4]. Para un marcado estandarizado existen herramientas de modelaje especializadas al ámbito legal como Akoma Ntoso, la cual ha disfrutado de aceptación entre varias jurisdicciones como el

Parlamento Europeo, el Parlamento Británico, el Parlamento Uruguayo, y la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, entre otros [5]. Es importante anotar, que, a pesar de que estas herramientas facilitan la labor de marcado, esta sigue siendo una tarea mayoritariamente manual o semiautomática, por lo que implica un costo humano [4].

En el caso de México, la mayoría de las leyes federales pueden ser consultables en formato pdf a través de la página <http://www.ordenjuridico.gob.mx> o <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>, sin embargo, dicho formato presenta limitantes frente a otros formatos más estructurados [4].

De esta forma, uno de los principales retos sigue siendo obtener y recuperar la información relevante [6], en especial en el caso de legislación que no cuenta con mucho tratamiento informático.

Para estos casos, la forma más sencilla es la búsqueda por palabras claves, donde un buscador compara la palabra ingresada, carácter por carácter, en un texto específico. Aunque esta búsqueda se puede refinar y cumple en primera instancia si se busca una pieza de información muy específica y conocida para referenciar, suele ser limitada si se busca encontrar información nueva o desconocida. Aunado a esto hay que considerar los problemas lingüísticos que enfrenta todo sistema documental: la polisemia (multiplicidad de significados para una palabra), la sinonimia (multiplicidad de palabras para un significado), la analogía (palabras que comparten algún núcleo de significado), la vaguedad (falta de precisión en el significado) y la hiponimia (la inclusión del significado de la especie en el género). [7]

Estos problemas, por su naturaleza, suelen ser mayores para los sistemas que se basan principalmente en la búsqueda lingüística, en vez de semántica.

Otros métodos utilizan sistemas más avanzados apoyándose en técnicas de Inteligencia Artificial y términos indexados de lenguaje natural, como lo son los modelos de recuperación booleano (*Boolean Retrieval Model*), los modelos de recuperación de espacio vectorial (*vector-space retrieval model*), los modelos de recuperación probabilística (*probabilistic retrieval model*), así como redes de inferencia. [8]. En este caso, al ser modelos probabilísticos, suelen tener las mismas dificultades lingüísticas, aunque la utilización de *corpus* en lenguaje natural previamente anotados es de utilidad.

Existen otras técnicas de Inteligencia Artificial, como el aprendizaje automático o semi automático, sin embargo, es importante recalcar que la mayoría de estas técnicas requieren en mínimo de datos previamente clasificados y anotados como *corpus* de entrenamiento [9], para ser confiables. Para el caso

del Derecho, si bien es útil utilizar *corpus* de textos de lenguaje natural, es necesario recordar que la ciencia jurídica utiliza un lenguaje tanto técnico como natural con peculiaridades y vocabulario propio [10], por lo que se vería beneficiado de contar con un *corpus* especializado, como los existentes en el campo de la medicina.

Para el caso específico de textos jurídicos, en el transcurso de esta investigación no se pudo encontrar ningún *corpus* específico, aunque no se descarta su existencia. En ese sentido se decidió crear una herramienta que pueda ayudar a clasificar los textos jurídicos utilizando conceptos propios del Derecho, lo cual podría servir posteriormente para crear *corpus* más especializados.

Al respecto, de acuerdo a la doctrina jurídica, se pueden encontrar ciertos componentes de una norma jurídica, los cuales son [11]:

- Una acción o actividad: se refiere a la conducta del sujeto normativo.
- Calificación deóntica o normativa de la acción: informa si la conducta se permite, prohíbe, obliga o “se tiene que hacer”.
- Modalidades de realización de la acción o actividad deónticamente calificada: son las circunstancias espacio-temporales y/o de un modo específico.
- Sujeto normativo: es aquel que realiza la acción o actividad.
- Condiciones de activación normativa: son aquellas circunstancias que debe realizarse para que se actualice la norma.

Por otro lado, una gramática formal es una estructura matemática con un conjunto de reglas de formación que definen las cadenas de caracteres admisibles en un determinado lenguaje formal o lengua natural [12]. Las gramáticas formales aparecen en varios contextos diferentes: la lógica matemática, las ciencias de la computación y la lingüística teórica, frecuentemente con métodos e intereses divergentes. En un lenguaje formal, a las cadenas formadas según las reglas de la gramática formal se las llama fórmulas bien formadas, y el conjunto de todas las fórmulas bien formadas constituye un lenguaje formal. Una gramática formal no describe el significado de las fórmulas bien formadas, sino solamente su forma. La teoría de los lenguajes formales estudia las gramáticas formales y los lenguajes formales, y es una rama de la matemática aplicada. Sus aplicaciones se encuentran en la ciencia computacional teórica, la lingüística, la semántica formal, la lógica matemática y otras áreas.

La jerarquía de Chomsky juega un papel importante en las gramáticas para el desarrollo de este trabajo, al diseñar gramáticas es importante restringir las reglas de producción,

esto para que se apliquen los patrones predeterminados y haciendo esto también se restringen las palabras que se pueden generar. Entre las clasificaciones de esta jerarquía se encuentran las gramáticas libres de contexto, utilizado principalmente para describir lenguajes de programación mediante una sintaxis, esta gramática también se puede utilizar para el análisis sintáctico de cadenas de caracteres que es lo que se busca en este trabajo. Estas gramáticas tienen la siguiente estructura:

$$G=(V, T, S, P) \in$$

Donde:

- V es el conjunto de variables, conocidos también como no-terminales (no aparecen en la cadena final).
- T es el conjunto de símbolos, conocidos también como terminales (aparecen en la cadena final).
- $S \in V$  es la variable inicial.
- P es el conjunto de reglas de producción de la forma  $p \rightarrow q$ .

Para el caso de este trabajo se considera que una gramática libre de contexto puede servir para definir la estructura de un artículo normativo con una calificación deóntica prohibitiva de tal forma que las cadenas bien formuladas (artículos) que sean aceptadas por la gramática se consideren enunciados prohibitivos. Por la misma forma en que se construye la gramática sirve en especial para la identificación de la redacción de normas prohibitivas mexicanas. Aunado a esto, ofrece la ventaja de que las mismas variables sirven como etiquetas de conceptos jurídicos.

Este método no es exhaustivo y solo es capaz de identificar un número limitado de artículos con cierta estructura.

### 3. Método

Este trabajo se enfocó en la creación de una gramática libre de contexto que pueda reconocer la estructura específica de un tipo de enunciado normativo con calificación deóntica.

Como se describió anteriormente, los calificativos deónticos se refieren al tipo de enunciados, ya sea que prohíben, permiten u obligan, por lo que se enfocó particularmente a los enunciados normativos prohibitivos.

Para tal efecto se utilizó el Código Penal Federal para analizar la estructura de este tipo de normas y poder construir la gramática. Este ordenamiento consta de dos libros y 429 artículos (sin contar los transitorios, derogados o con adverbio numeral: *bis*, *ter*, *quater*), sin embargo únicamente el Libro Segundo se compone principalmente de normas prohibitivas, por lo que no se consideró el Libro Primero.

Al analizar la estructura se identificaron los siguientes componentes:

\* Sujeto normativo: es la persona a la que se le imputa la comisión del delito. Suele ser enunciado mediante un artículo determinado y un relativo, donde adicionalmente puede existir una mención más específica del sujeto. Un ejemplo de esto se da en el Artículo 124 que a la letra menciona: Se aplicará la pena de prisión de cinco a veinte años y multa hasta de veinticinco mil pesos, *al mexicano* que...

\* Verbo sancionador: es el verbo que impone la pena, y que generalmente se identifica por los verbos conjugados de *aplicar* o *imponer* en tercer persona del tiempo futuro.

\* Pena: es el castigo que impone la ley al verificarse la comisión de un delito. La pena puede ser pecuniaria, es decir, referirse a una multa monetaria, o pena privativa de libertad, donde se define el tiempo en prisión. Generalmente se enuncia un rango del que posteriormente el juez determinará la pena específica por caso. Es usual que un delito incluya tanto una pena pecuniario como una privativa de libertad.

\* Acción ilícita: es la acción prohibida cuya comisión deriva a una pena.

La gramática que se elaboró para describir estos componentes, descrita en *Extended Backus-Naur Form* (EBNF), es la siguiente:

```

<sujeito_normativo> ::= [al|el|aquellos|a los]
{<texto>} que {<texto>}

<verbo_sancionador> ::= se
[le|les|vacío][impondrá|impondrán|aplicará|aplicarán]

<pena> ::= [la][pena|pena de prisión|multa] <rango>
[de prisión|multa]

<rango> ::= [de|a|hasta|y|(vacío)] <cantidad_en_letra>
[<unidad_tiempo>|<unidad_monetaria>|(vacío)] [<rango>]

<cantidad_en_letra> ::= {<texto>}

<unidad_tiempo> ::= [años|meses] {de prisión}

<unidad_monetaria> ::= [pesos|salarios minimos|dias multa]

<accion_ilicita> ::= {<texto>}

<texto> ::=
a|b|c|d|e|f|g|h|i|j|k|l|m|n|ñ|o|p|q|r|s|t|u|v|w|x|y|z|A|
B|C|D|E|F|G|H|I|J|K|L|M|N|Ñ|O|P|Q|R|S|T|U|V|W|X|Y|Z

```

Es a través de las distintas configuraciones de estos compuestos que se pueden identificar ciertas normas prohibitivas del Código Penal Federal.

Para poder verificar la gramática realizada en este trabajo, se tomó el artículo 123 primer párrafo del Código Penal Federal el cual dice:

Artículo 123. - Se impondrá la pena de prisión de cinco a cuarenta años y multa hasta de cincuenta mil pesos al mexicano que cometa traición a la patria en alguna de las formas siguientes.

La estructura elegida es:

<norm\_prohibitiva> ::= <verbo\_sancionador>  
<pena><sujeito\_normativo> <accion\_ilicita>

Cuyo árbol de derivación es el siguiente:

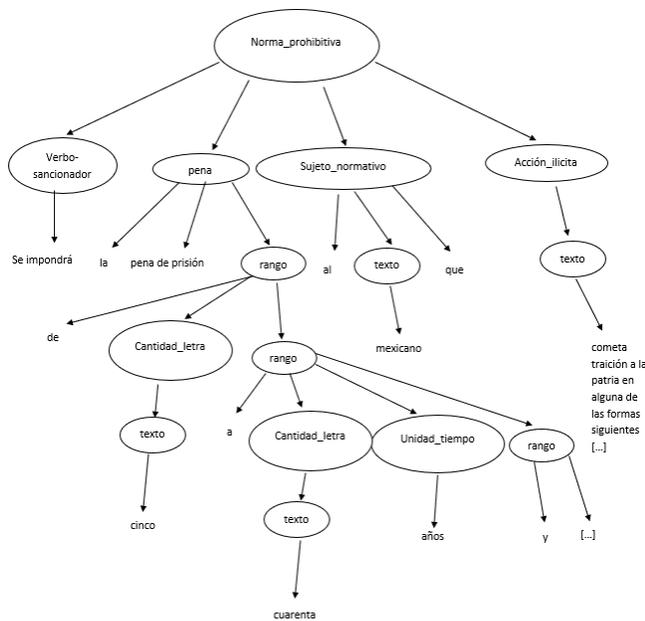


Fig 1. Árbol de derivación

#### 4. Resultados

Al utilizar la configuración anterior, se encontraron otros artículos esta estructura en el Capítulo I y II de este Título (Delitos Contra la Seguridad de la Nación) son: Artículos 124 proemio, 125, 127 párrafo 1, y 3, 128 y 129.

Los artículos 130 al 132 cumplen con la estructura similar al de los primeros artículos vistos, al igual que el 134.

En el caso del Artículo 127 párrafo 2, la gramática no cumple al utilizar una referencia previa, al igual que el artículo 133.

Otros ejemplos de artículos no compatibles con la gramática propuesta son los artículos 136, 137 y 138, sin

embargo, los artículos siguientes hasta el capítulo IX cumplen completamente con la estructura para la gramática.

Sin embargo, en el caso del artículo 136, que a la letra establece:

Artículo 136.- A los funcionarios o agentes del Gobierno y a los rebeldes que después del combate causen directamente o por medio de órdenes, la muerte a los prisioneros, se les aplicará pena de prisión de quince a treinta años y multa de diez mil a veinte mil pesos.

Una configuración diferente, como la siguiente, cumpliría la estructura:

<norm\_prohibitiva> ::= <sujeito\_normativo>  
<accion\_ilicita> <verbo\_sancionador> <pena>

Por lo que se demuestra su versatilidad.

#### 5. Conclusiones

A través de este trabajo se comprobó que es posible realizar una gramática que describa cierto tipo de enunciado normativo. Este es un primer paso para la recuperación y clasificación automática de textos jurídicos, utilizando conceptos propios de este campo de conocimiento aplicado en especial a la estructura semántica de las leyes mexicanas.

En este caso se utilizó el Código Penal Federal para obtener la estructura de enunciados deónticos prohibitivos. La gramática no identificó todos los enunciados normativos prohibitivos, por lo que es un método limitado, sin embargo demostró ser eficaz para otros tantos. Este es uno entre muchos métodos para la identificación y correcta clasificación automática de la información jurídica. La ventaja de este método es que no requiere ningún *corpus* de entrenamiento para su funcionamiento y, en cambio, puede funcionar como una herramienta para la creación de *corpus* anotados semánticamente especializados en el Derecho mexicano para métodos más avanzados.

#### 6. Referencias

- [1] H. Fix Fierro, Informática y Documentación Jurídica, 2do ed., Facultad de Derecho-UNAM, 1996.
- [2] A.E. Pérez Luño, Ensayos de Informática Jurídica, 2do ed., Fontamara, 2001.
- [3] M. L. Alvite Díez, "Las bases de datos jurídicas y el uso del lenguaje XML en España", en *Scire: Representación y Organización del Conocimiento*, Vol. 15, Nº 1, Universidad de Zaragoza, 2009.
- [4] M. Palmirani y F. Vitali, *Xml Legislativo: Principios e Instrumentos Técnicos*, Banco Interamericano de Desarrollo, 2012.
- [5] G. Vergottini, *The Pocket Guide to Akoma Ntoso*, 2do ed., Xential Corporation, 2018.
- [6] W. Fitch y A. Friederici, Artificial grammar learning meets formal language theory: an overview. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012.
- [7] J. Téllez Valdes, *Derecho Informático*, 2da ed., McGRAW-HILL, 1996.

- [8] M-F. Moens, "Innovative techniques for legal text retrieval" in *Artificial Intelligence and Law*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [9] G. E. Sierra Martínez, Introducción a los corpus lingüísticos, Instituto de Ingeniería UNAM, 2015.
- [10] M. del C., Platas Pacheco, Filosofía del Derecho: Lógica jurídica, 3ra ed., Porrúa, 2008.
- [11] E. Cáceres Nieto, ¿¿Qué es el derecho?? | Lenguaje y derecho. Nuestros derechos. UNAM-IIIJ. Colección Biblioteca Constitucional. Serie Nuestros derechos, 2016.
- [12] G. Rozenberg y A. Salomaa, Handbook of Formal Languages: Volume 3 Beyond Words. Springer Science & Business Media, 2012.

## **7. Biografías**

Mariana Sánchez: Egresada de la Facultad de Derecho de la Universidad Nacional Autónoma de México y estudiante de la Facultad de Ingeniería de la misma institución.

Luis Francisco Ríos: Estudiante de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

# Reconstrucción de objetos en 3-D por método de cambio de fase utilizando franjas RGB

M. Alejandro López-Cristerna<sup>a</sup>, J. Carlos Pedraza-Ortega<sup>b</sup>, J. Manuel Ramos-Arreguin<sup>c</sup>, Efrén Gorrostieta-Hurtado<sup>d</sup>, Saúl Tovar-Arriaga<sup>e</sup>, Rodrigo Escobar Díaz-Guerrero<sup>f</sup>.

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería

<sup>a</sup> [ing.alejandrocristerna@gmail.com](mailto:ing.alejandrocristerna@gmail.com), <sup>b</sup> [caryoko@yahoo.com](mailto:caryoko@yahoo.com), <sup>c</sup> [jsistdig@yahoo.com](mailto:jsistdig@yahoo.com), <sup>e</sup> [efrengorrostieta@gmail.com](mailto:efrengorrostieta@gmail.com), <sup>e</sup> [saul.tovar@uaq.mx](mailto:saul.tovar@uaq.mx), <sup>f</sup> [rodediazg@gmail.com](mailto:rodediazg@gmail.com)

**Resumen.** Este artículo presenta una propuesta de solución al problema de la reconstrucción en 3D (tercera dimensión) de objetos a través del método de cambio de fase utilizando franjas de colores rojo, verde y azul. El algoritmo utilizado en esta investigación se denomina algoritmo de cambio de fase, que consiste en extraer la forma de la superficie 3D y la información de la distorsión del patrón de luz proyectado en el objeto (fase de la imagen); esta información se puede calcular a partir de la forma y desplazamiento de la luz estructurada. En esta técnica, la información topográfica de un objeto se reconstruye a partir de la deformación de las franjas de fase periódicas y desplazadas proyectadas sobre el objeto. La proyección de los patrones de franjas en colores rojo, verde y azul se ha utilizado en investigaciones previas, pero a diferencia de estudios anteriores, este trabajo mejoró el proceso de reconstrucción, considerando una mejor calidad de color y nitidez, además, se aplica un filtrado utilizando transformada de Fourier como una etapa de post-procesamiento, reduciendo el ruido que se presenta en la reconstrucción final de los objetos que utilizan el algoritmo tradicional de cambio de fase.

*Palabras clave.* Reconstrucción 3D, franjas de colores, cambio de fase, filtrado de señales.

## 1. Introducción

La determinación de la forma 3-D (tercera dimensión) de un objeto a partir de un conjunto de imágenes bidimensionales ha sido un gran desafío en el área de la visión por computadora durante varios años. Una de las razones de esto es que todavía no podemos explicar claramente cómo los seres humanos pueden percibir la profundidad en una escena [1].

Aun así, se han logrado grandes avances en la obtención de la estructura tridimensional de escenas u objetos reales. El aumento en las capacidades de computación hace posible procesar volúmenes de datos previamente intratables, mejorando las técnicas y haciéndolas más rápidas y precisas. Esta capacidad para modelar escenas del mundo real dentro de una computadora es muy ventajosa en áreas como la industria, el diseño industrial o las artes gráficas.

En este caso, para la reconstrucción de objetos, se utilizó el método de cambio de fase (phase-shifting en inglés), que consta de varias etapas en las que la información de profundidad se purifica progresivamente. Para que esto sea posible, se previó la imagen del objeto con las franjas proyectadas, más adelante, es necesario separar la imagen capturada de la proyección de las franjas de color rojo, verde y azul (RGB Red, Green and Blue por sus siglas en inglés) en sus tres canales R, G, B, respectivamente. A través de la combinación de la intensidad de los tres canales se obtiene una imagen que contiene la fase,

y ésta a su vez la altura del objeto, lo cual es la reconstrucción 3D del mismo.

Los métodos tradicionales basados en el algoritmo de cambio de fase al final del proceso muestran una reconstrucción que presenta ondulaciones al final del proceso de reconstrucción, las cuales presentan un patrón periódico y el cual puede ser removido con el propósito de mejorar el proceso de obtención de la altura del objeto. Por esta razón, se propone el uso de una serie de filtros basados en la transformada de Fourier, con el propósito de reducir el ruido y mejorar el resultado final en el proceso de reconstrucción 3D de los objetos [2].

## 2. Fundamentación teórica y análisis de algoritmo del método de cambio de fase

Dado un conjunto de imágenes, con diferentes vistas del mismo entorno, es muy probable que exista una relación entre ellas. Esta relación está dada por una geometría implícita en el conjunto de imágenes. Gracias a esta geometría es posible obtener la reconstrucción tridimensional del entorno capturado por el conjunto de imágenes. El propósito de la recreación con computadora es generar entornos virtuales tridimensionales a partir de imágenes de entornos reales, para los cuales utiliza métodos que pertenecen principalmente al área de visión por computadora, pero también se basa en técnicas que pertenecen a otras áreas como: procesamiento digital de imágenes y tramas. De tal manera que todo el proceso de recreación por computadora, mejor conocido como reconstrucción tridimensional, se puede dividir en tres pasos [7]:

1. Procesamiento digital de imágenes.
2. Visión por Computadora.
3. La visualización de la reconstrucción.

A continuación se presentan los pasos para la reconstrucción tridimensional:

1. Procesamiento digital de imágenes
  - 1.1. Adquirir la imagen.
  - 1.2. Filtrar la imagen.
  - 1.3. Encuentra las correspondencias de puntos.
2. Visión por computadora
  - 2.1. Calibrar la cámara.
  - 2.2. Estimación de los parámetros de orientación y posición.
  - 2.3. Triangulación.
3. Visualización
  - 3.1. Generación de la malla de reconstrucción.
  - 3.2. Extraer la textura de las imágenes.
  - 3.3. Visualizar reconstrucción tridimensional.

Para la aplicación de los pasos en la reconstrucción tridimensional, en este caso, el algoritmo de cambio de fase se implementará con una sola máscara RGB, que se compone de los tres canales (Rojo, Verde y Azul), donde la diferencia de fase entre dos canales es de 120°. La franja sinusoidal de color se proyecta sobre una superficie plana y se captura con la cámara de color CCD (Charged Coupled Device), esta imagen se utiliza como plano de referencia. El método de cambio de fase de tres pasos se utiliza para obtener la fase del objeto. Por lo que para generar la malla antes mencionada, los canales rojo, verde y azul deben estar desfasados, entonces, se establece que la intensidad de cada píxel para cada uno de los canales es la siguiente:

$$I_R(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left[(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right] \quad (1)$$

$$I_G(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[(x, y)] \quad (2)$$

$$I_B(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos\left[(x, y) + \frac{2\pi}{3}\right] \quad (3)$$

El patrón de franjas combinado se muestra en la Fig. 1.

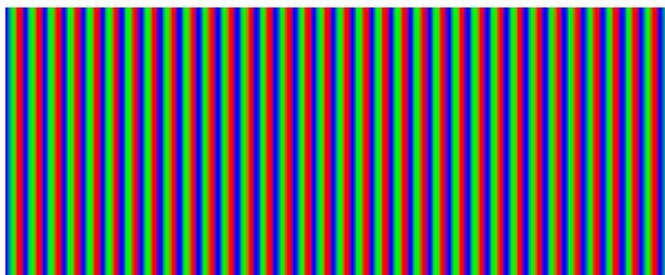


Fig. 1. Franja sinusoidal de color en RGB

Por siguiente, la recopilación física de la información se obtendrá mediante una triangulación entre un proyector, la cámara, que será la que capturó la máscara proyectada y el objeto de interés, como se puede observar en la Fig. 2. Y, finalmente, el objeto sobre el cual se desea obtener la información.

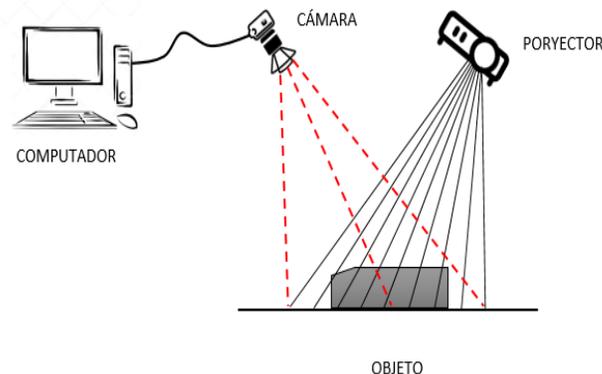


Fig.2. Triangulación del sistema de captura

Una vez generada y proyectada la malla de reconstrucción de acuerdo con el método a utilizar, se capturan las imágenes y mejoran mediante uno o varios métodos. Por ejemplo, la transformada de perspectiva, como es en este caso. Finalmente, se obtiene un mapa de fase, que contiene el perfil de la imagen, lo que resulta en un conjunto de características del objeto.

La fórmula para generar la malla antes mencionada (ec.4) establece que:  $I_R(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$  son las intensidades de cada píxel en los canales rojo, verde y azul, respectivamente.  $I'(x, y)$ , es la modulación de intensidad y  $I''(x, y)$ , es el promedio de intensidad y  $I''(x, y)$ , es la modulación de intensidad.  $\emptyset(x, y)$ , es la fase deseada relacionada con el perfil del objeto. Resolviendo ecs. (2) - (4), el  $\emptyset(x, y)$  se puede lograr mediante:

$$\emptyset(x, y) = \tan^{-1}\left(\sqrt{3} \frac{I_R - I_B}{2(I_R - I_B - I_G)}\right) \quad (4)$$

La función de arco tangente dará como resultado un valor en el rango de  $-\pi$  a  $\pi$  con  $2\pi$  discontinuidades (Fig.3).

La base de la tira de codificación de la fase de color: es una fase de escalera b (fase de escalera b)  $(x, y)$  que va de  $-\pi$  a  $\pi$  se muestra en la Fig. 3. La fase se codifica en la intensidad de los canales, y la diferencia de fase entre dos canales es de 120 grados como se muestra en la Fig. 4. La Fig. 5 muestra el proceso de composición de la tira de codificación de la fase de color. El proceso para resolver el problema se expresa de la siguiente manera:

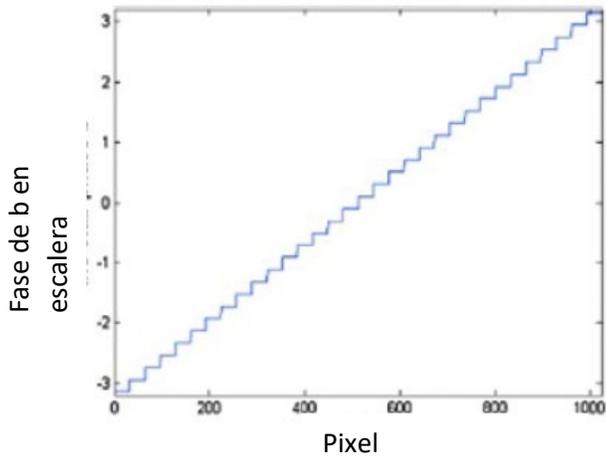


Fig. 3. Grafica de pixeles en escalera [3].

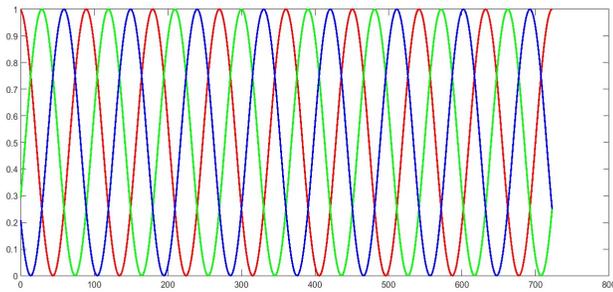


Fig. 4. Grafica de intensidad de pixeles.

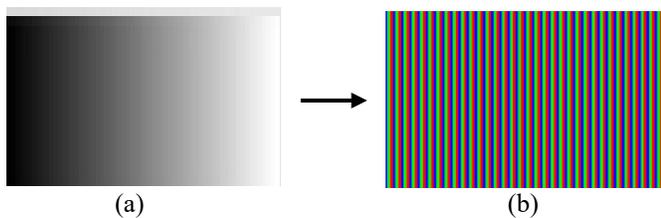


Fig. 5. Proceso de composición de franjas de codificación de fase de color. (a) franjas de codificación de fase en RGB (b) tira de codificación de fase de color

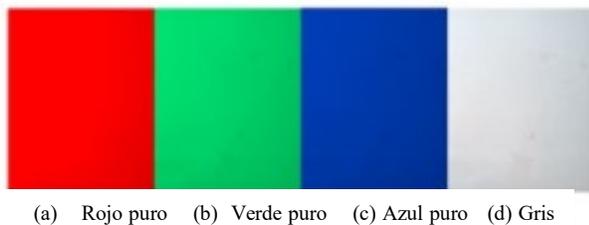


Fig. 6. Calibración de colores al tono más puro. (a) Rojo, (b) Verde, (c) Azul y (d) Gris. [3]

Paso 1: Se procede a graficar ecuación tipo escalera:

$$b(x, y) = -\pi + \frac{x}{p} 2 \frac{\pi}{N} \quad (5)$$

Aquí  $(x, p)$  es el orden del rango ideal obtenido por la operación de redondeo, "x" e "y" son los píxeles horizontal y vertical del proyector, respectivamente.  $2p / N$  significa la altura de la escalera. N es el número total de ciclos marginales. P es el tono marginal.

Paso 2: la fase de escalera  $b(x, y)$  se codifica en tres canales para formar la tira de codificación de fase de color:

$$I_{R'}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y) - 2\frac{\pi}{3}) ]}{2} \quad (6)$$

$$I_{G'}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y)) ]}{2} \quad (7)$$

$$I_{B'}(x, y) = \frac{255 [ 1 + \sin(b(x, y) - \frac{2}{3}) ]}{2} \quad (8)$$

Aquí  $(x, y)$ ,  $I_G(x, y)$ ,  $I_B(x, y)$  son las intensidades de cada píxel en los canales rojo, verde y azul, respectivamente.

Paso 3: Obtenga la fase de escalera de la tira de codificación de la fase de color a través del método de cambio de fase de tres pasos.

Paso 4: Determine el orden marginal k de la fase de escalera mediante el método de cambio de fase con una sola máscara RGB, se realiza la reconstrucción de objetos en la tercera dimensión, aplicando y mejorando los algoritmos definidos por este procedimiento, favoreciendo la reconstrucción del objetos.

De esta manera, la lectura y extracción de datos se determinan con mayor precisión y la forma del objeto adquiere menos errores al capturar la información de interés.

### 3. Resultados

Se requiere una serie de pasos para obtener mejores resultados para la reconstrucción tridimensional del objeto.

En primer lugar, las franjas RGB se proyectan de forma vertical sobre el objeto, después, se toman captura la imágenes con las franjas de colores proyectadas.

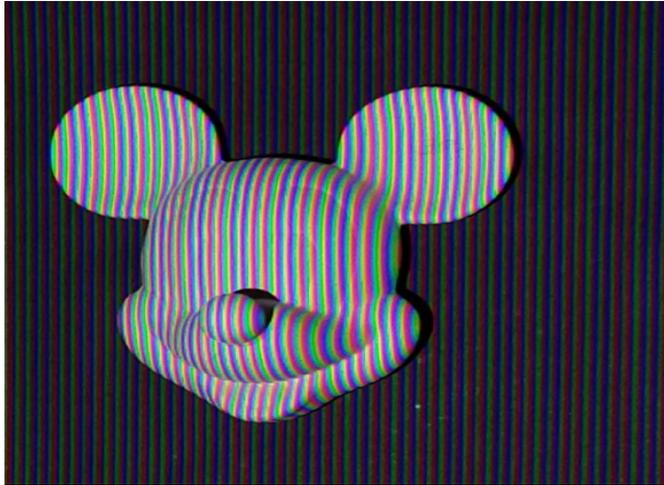


Fig. 7. Proyección de franjas al objeto que se desea reconstruir

Una vez que se proyectan las tiras RGB y se captura la imagen a reconstruir (Fig. 7), se procesa de tal manera que los canales de color de la imagen se separan, lo que resulta en lo siguiente (Fig.8):

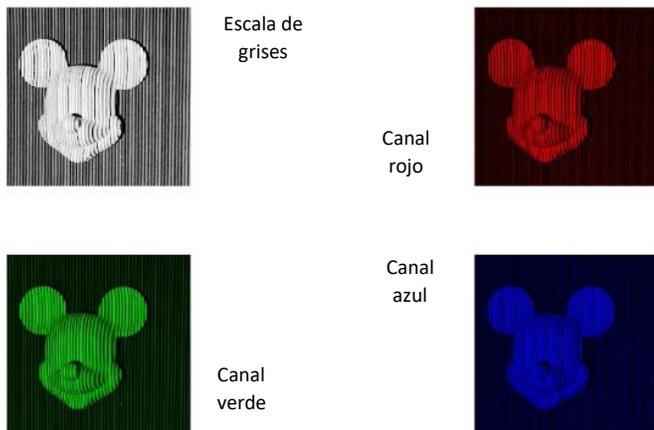


Fig. 8. Separación de canales de imagen capturada

La imagen separada en sus tres canales disponibles se utiliza para la creación del objeto en la tercera dimensión (Fig. 10), estando en primer plano y sin ningún tipo de filtrado, la imagen del objeto convertida a escala de grises (Fig.9).

Fig. 9. Imagen capturada convertida a escala de grises para su procesamiento

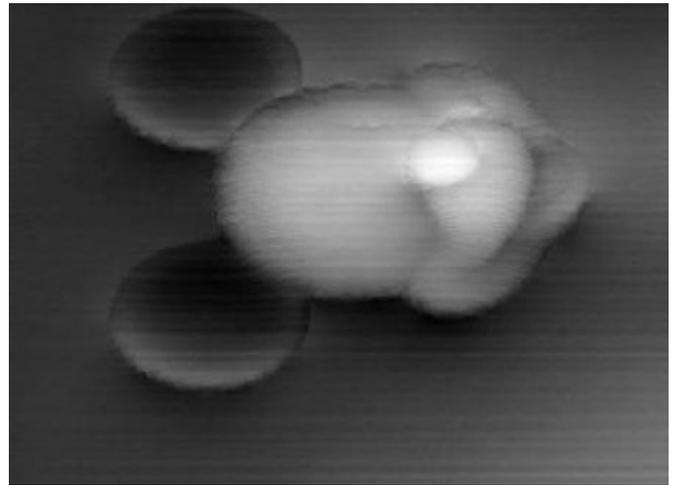
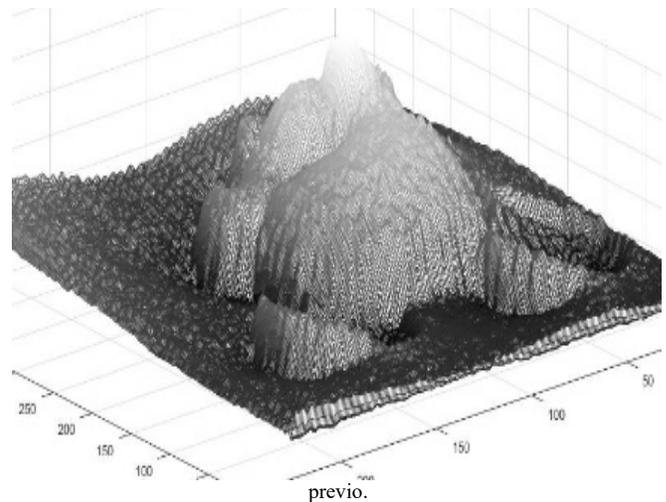


Fig. 10. Reconstrucción tridimensional de objetos sin ningún tipo de filtrado



Una vez que los resultados obtenidos de la reconstrucción del objeto han sido analizados, la superficie se detecta con un ruido abrupto (Fig. 10). Se decide corregirlo mediante el análisis de su espectro, detectando ciertas anomalías en algunas regiones de la información que arroja su lectura, que procede a la aplicación de una máscara binaria para la eliminación del ruido en ciertas regiones del espectro, lo que resulta en una reconstrucción considerable con menos ruido (Fig.11) (Fig.12).

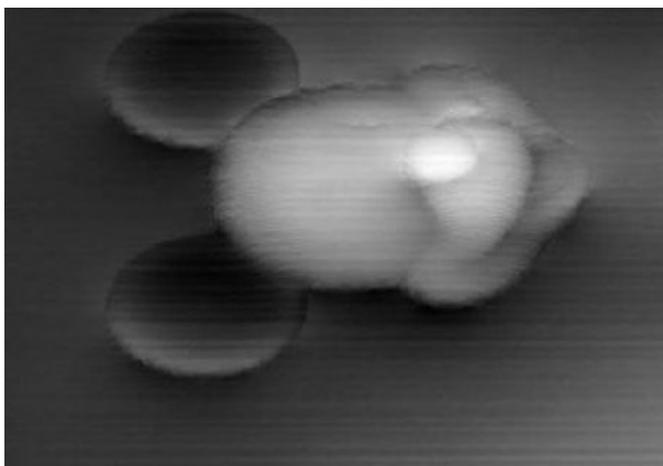
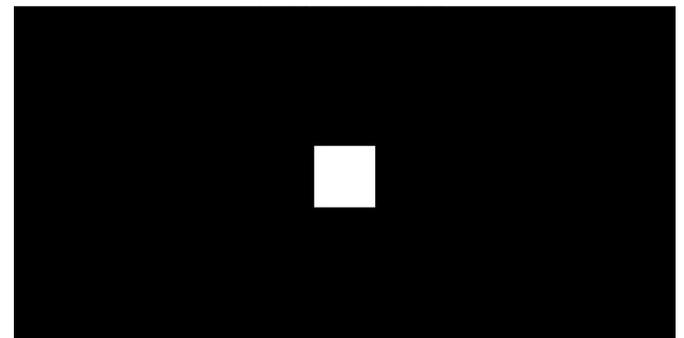
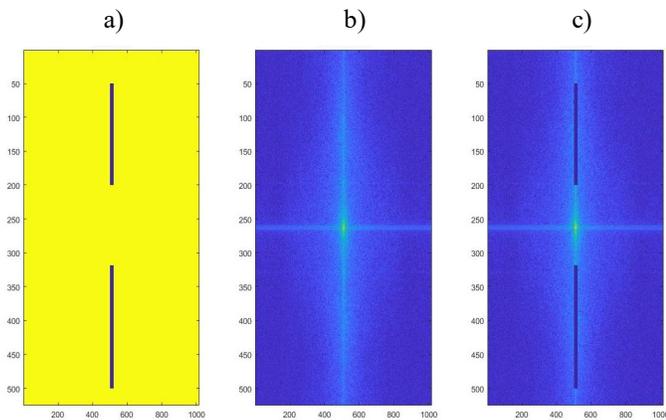
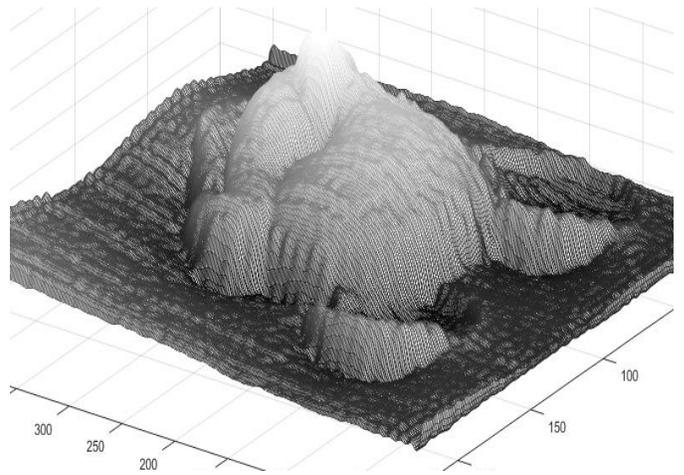
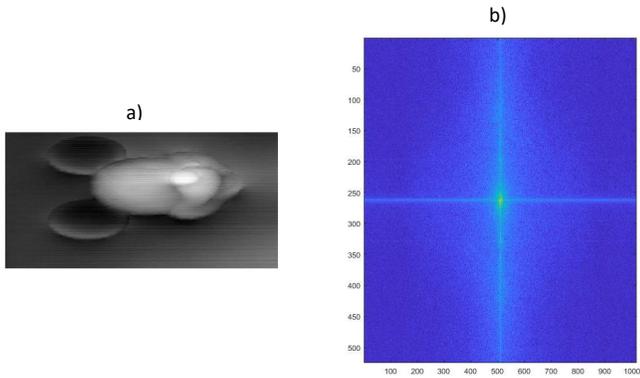


Fig. 15. Máscara binaria con filtrado de Fourier.

Al observar el resultado (Fig.14) que dio la aplicación de la máscara binaria (Fig.15) a la imagen original del objeto, se notó que la reducción del ruido en la superficie era muy pequeña, por lo que se procedió a la aplicación de un segundo filtrado de manera general (en toda la imagen), trabajando en esta ocasión con un filtro de Fourier con una máscara binaria de unos y ceros, que resulta en una imagen corregida en gran parte sin tanta pérdida general de información, obteniendo un mejor resultado en el proceso de reconstrucción 3D de los objetos.

Fig. 13. Imagen del objeto filtrado con máscara de ceros y unos.

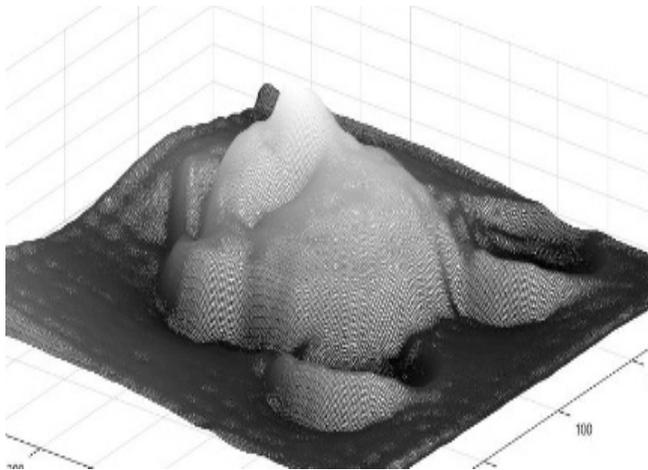


Fig. 16. Resultado de la aplicación de máscara binaria con filtrado de Fourier.

Con el propósito de validar el método propuesto, se lleva a cabo una comparación con objetos del trabajo propuesto por B.Li et al (2015) [3]. Los resultados de esta comparación se pueden observar en las figuras 17 y 18.

Como se puede observar, la reconstrucción obtenida con el método propuesto presenta, una menor oscilación en la forma final del objeto, lo cual indica que nuestro método tiene un mejor desempeño.

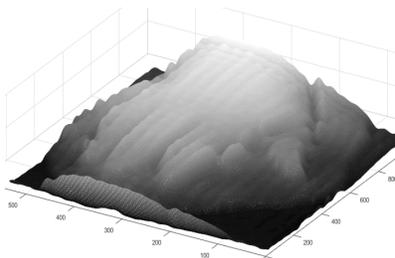


Fig. 17. Reconstrucción del objeto sin transformada de Fourier.

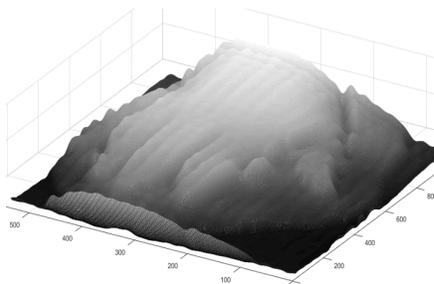


Fig. 18. Resultado de reconstrucción con transformada de Fourier aplicada.

#### 4. Conclusiones

La obtención de la topografía de objetos en formas simples se obtiene manteniendo con éxito sus características físicas (dimensiones, volumen y forma), con una sola imagen proyectada en "RGB" y utilizando el algoritmo de cambio de fase (phase-shifting).

Es muy importante realizar una calibración adecuada del sistema de proyección y captura, así como un buen análisis de los resultados obtenidos para poder determinar si se aplica algún tipo de filtro posterior a la reconstrucción 3D, como una etapa de post-procesamiento.

En este trabajo se propuso el uso de un filtro supresor de banda, mediante el uso de la transformada de Fourier.

Con el propósito de validar el método se llevaron a cabo comparaciones con trabajos previos en la literatura.

#### 5. Referencias

- [1] Grandón-Pastén, N., Aracena-Pizarro, D., & Tozzi, C. L. (2007). Reconstrucción de objeto 3D a partir de imágenes calibradas. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 15(2), 158-168.
- [2] S. McCann, (January 05, 2015) "3D Reconstruction from Multiple Images." Retrieved: June 15, 2016.
- [3] B. Li, Y. Fu, J. Zhang, H. Wu, G. Xia, G. Jiang. (October of 2015). "A fast three-dimensional shape measurement method based on color phase coding." *ELSEVIER*, 1, 5.
- [4] [4] N. Grandón - Pastén, D. Aracena-Pizarro, C.L. Tozzi. (Agosto 20,2007). "Reconstrucción de objeto 3d a partir de imágenes calibradas." *Revista chilena de ingeniería*, 1, 11.
- [5] S. McCann, (January 05, 2015) "3D Reconstruction from Multiple Images." June 15, 2016.
- [6] I. Vite Silva, L.G. de la Fraga. (Julio de 2008). "Reconstrucción Tridimensional de Objetos Mediante Técnicas Evolutivas". México, D.F: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
- [7] R.E. Díaz Guerrero. (Junio 2016). "Digitalización de solidos utilizando análisis de franjas y técnicas de desplazamiento de fase en arquitecturas ARM". Querétaro, Qro. Centro Universitario, UAQ.
- [8] L. Flores, A. Muñoz, S. Ordoñez, G. Garcia-Torales, A. Ferrari. (January 17, 2017). "Color-fringe pattern profilometry using an efficient iterative algorithm." *Optics Communications*. ELSEVIER.
- [9] W. Yin, X. Cheng, J.Xie, H. Cui, Yingying Chen. (May 23, 2017). "High-speed 3D profilometry employing HSI color model for color Surface with discontinuities". *Optics and Laser Technology*. ELSEVIER.
- [10] Y. Ding, J. Xi, Y. Yu, F. Deng, J. Cheng. (April 11,2017). "Recovering the absolute phase maps of three selected spatial-frequency fringes with multi-color channels". *Neurocomputing*. ELSEVIER.

## 5. Biografías

### A) Manuel Alejandro López Cristerna

Se tituló como Ingeniero en Electrónica con línea terminal en Automatización y Control en el Tecnológico Nacional de México campus Culiacán, llevó a cabo sus estudios finales enfocados en el área de Procesamiento Digital de Imágenes. Actualmente se encuentra matriculado en el programa ofrecido por la Universidad Autónoma de Querétaro para obtener el grado de M. en C. en Inteligencia Artificial, orientando su trabajo al área de Visión por Computadora.

### B) Jesús Carlos Pedraza Ortega

El Doctor Jesús Carlos Pedraza Ortega realizó sus estudios de Maestría en la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE – Universidad de Guanajuato) con especialidad en Instrumentación y Sistemas Digitales. El Doctorado en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica - Sistemas de Reconstrucción 3D lo realizó en la University of Tsukuba en Japón, donde trabajó con técnicas de reconstrucción 3D basado en método de visión pasiva. Actualmente es profesor e investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

### C) Juan Manuel Ramos Arreguin

El Doctor Juan Manuel Ramos Arreguin recibió su título de Maestro en Ciencias en ingeniería eléctrica y sistemas digitales por la Universidad de Guanajuato y posterior, su Doctorado en Ciencia y Tecnología por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Desde 2009, ingresó a la Universidad Autónoma de Querétaro y actualmente es profesor-investigador de la Facultad de Ingeniería.

### D) Efrén Gorrostieta Hurtado

El Doctor Efrén Gorrostieta es profesor-investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Estudió Ingeniería Electrónica, recibió una maestría en Ciencias en Control y Automatización y un doctorado en Mecatrónica. Fue cofundador de la Asociación Mexicana de Mecatrónica y fue presidente de la Sección IEEE Querétaro, además de haber sido presidente del Capítulo de Inteligencia Computacional IEEE Querétaro.

### E) Saúl Tovar Arriaga

El Doctor Saúl Tovar Arriaga pertenece al sistema nacional de investigadores (CONACyT) sin interrupción desde 2013. En 2016, fue responsable de la creación del Máster en Inteligencia Artificial en la Universidad Autónoma de

Querétaro. Desde 2017, es presidente del capítulo de la IEEE Computational Intelligence Society. Desde enero de 2017 hasta diciembre de 2018, presidió la Sección de IEEE Querétaro. Es docente en la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro e imparte temas como Programación, Inteligencia Artificial, Robótica y Matemáticas.

### F) Rodrigo Escobar Díaz Guerrero

Estudió Ingeniería en Computación y Maestría en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Querétaro. Ha trabajado como colaborador en proyectos de investigación en desarrollo de hardware y software con profesores-investigadores de la facultad de ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro.

# Análisis del estado de esfuerzos de los martillos de forja en frío para la fabricación de cañones de armamento

A. Hernández<sup>1,a</sup>, V. F. Verduzco<sup>2,b</sup>, G. Urriolagoitia<sup>1,c</sup>, B. Romero<sup>1,d</sup>, G. M. Urriolagoitia<sup>1,e</sup>, C. R. Torres<sup>1,f</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Depto. de Biomecánica SEPI ESIME ZACATENCO

<sup>2</sup> SEDENA, Dirección General de Industria Militar, Producción Fabrica de Armas

<sup>a</sup>ahernandezc9800@egresado.ipn.mx, <sup>b</sup>verduzcomx@yahoo.com.mx, <sup>c</sup>guiurri@hotmail.com, <sup>d</sup>romerobeatriz97hotmail.com

**Resumen**— En este trabajo de investigación, se realiza un estudio mediante análisis numérico para conocer el estado de esfuerzos al que se encuentran sometidos los perfiles angulados de los martillos de forjado utilizados en la fabricación de cañones de armamento. Se considera una máquina de disposición radial, en la que el proceso de forjado se lleva a cabo en frío. Se estudian los perfiles angulados, ya que estos facilitan el proceso inicial de forjado durante el golpeteo de los martillos y permiten el flujo de material durante el conformado del cañón. En el proceso de forjado se presentan esfuerzos debidos principalmente a la acción de cargas externas sobre los materiales que provocan la elongación y contracción por los efectos de la presión en el forjado. Así como, la predicción de las cargas son parámetros muy importantes para considerar en el proceso de forjado en frío, ya que de estos parámetros, depende la manera en que se llevará a cabo la deformación plástica de los materiales. Por otro lado, en el proceso de fabricación de los cañones de armamento se presentan fallas en los martillos de forjado, principalmente en la zona del perfil de la herramienta. Entre las más comunes se encuentra la deformación plástica, por lo que es necesario comprender y analizar los mecanismos que provocan estas fallas, ya que estas inciden de manera directa en el comportamiento y desempeño de la herramienta.

*Palabras clave.* Forjado en frío, cañones, armamento, deformación plástica

**Abstract**— In this research, a study is made by numerical analysis to know the state of efforts to which the angled profiles of the forged hammers used in the manufacture of weapon cannons are subjected. It is considered a radial arrangement machine, in which the forging process is carried out in cold. The angled profiles are studied, since these facilitate the initial process of forging during the hammering of the hammers and allow the flow of material during the forming of the barrel. In the forging process, stresses are mainly due to the action of external loads on the materials that cause the deformation, which is why the effects of the pressure in the slab. As well as, the prediction of deformation loads are very important parameters to consider in the cold forging process, since the way in which the plastic deformation of the materials will be carried out depends on these parameters. On the other hand, in the manufacturing process of the armament cannons there are faults in the slab hammers, mainly in the area of the profile of the tool. Among the most common is the plastic deformation, so it is necessary to understand and analyze the mechanisms that cause these failures, as these directly affect the behavior and performance of the tool.

*Keywords.* Forged in cold, guns, armament, plastic deformation

## 1. Introducción

Una de las principales funciones del ejército mexicano es la de salvaguardar la soberanía nacional. Además de garantizar la paz interior. Para cumplir con esta misión se requiere de equipos y recursos materiales entre los que se encuentran las armas y municiones. Estas suministradas por la Dirección General de Industria Militar (D. G. I. M.), dependencia encargada de producir diversos tipos de armas, municiones y herramientas. Además de ser responsable del mantenimiento de equipos industriales y armamento. Así como corresponde a la Dirección General de Industria Militar satisfacer las necesidades de vida y operación del Ejército y Fuerza Aérea Mexicanos por medio del apoyo técnico, administrativo y logístico respecto a la fabricación y mantenimiento del material de guerra. Por lo que, se presenta la necesidad de diseñar y estudiar el comportamiento de los diferentes mecanismos que integran los productos fabricados lo que incluye dispositivos y herramientas, para garantizar el correcto funcionamiento del armamento y productos fabricados. [1]

Este trabajo se enfoca en el análisis del estado de esfuerzos de los martillos de forjado (herramientales) en frío, los cuales tienen la función de forjar el cañón del fusil FX05. El objetivo principal es estudiar el perfil angulado de los martillos de forja, el cual tiene la función de facilitar el proceso inicial de forjado al momento de iniciar el golpeteo de los martillos. Así como, el flujo de material en el conformado del cañón. Durante el proceso de forjado se presentan esfuerzos debidos a la acción de cargas externas en los materiales que provocan la deformación. Por lo que, los efectos de estos esfuerzos. Asimismo la predicción de las cargas entre el herramental y el cañón son parámetros de vital importancia en el proceso de conformado en frío, ya que de estos depende la manera en que se llevará a cabo la deformación plástica de los materiales [2] [3]. Generalmente cuando se diseñan componentes mecánicos se debe tener en cuenta que los esfuerzos generados debido a las cargas a las que se encuentran sometidos tales componentes en operación no rebasen la resistencia del material. Por esta razón, cuando se usan materiales dúctiles se analiza la resistencia a la cedencia por el hecho de que la deformación permanente del material es considerada como una falla. Las fallas en los elementos mecánicos se dan debido a la pérdida de funcionalidad, lo que hace que dejen de ser útiles y pueden ser fallas por rotura, distorsión permanente o-

degradación. Para el caso de los martillos de forjado, la falla que con mayor frecuencia se presenta es por deformación plástica y degradación [3] Fig. 1. Estas fallas se presentan debido a que los esfuerzos inducidos en los elementos mecánicos superan la resistencia del material de fabricación. Para el análisis y estudio de las fallas en el diseño de piezas se apoya en la teoría de falla con base en la comparación del esfuerzo actuante contra el aplicado en pruebas uniaxiales de tensión o compresión [3].

Fig. 1. Detalle de falla en un martillo de forjado por deformación plástica

Para el caso de este estudio se apoya en la teoría de la energía de distorsión máxima, también conocida como de energía cortante o de Von Mises-Henki, se considera que la fluencia del material se presenta cuando la energía asociada al cambio de forma en un cuerpo multiaxial es igual a la energía de distorsión en una probeta a prueba de tensión cuando la cedencia se presenta en el esfuerzo de cedencia  $\sigma_y$ . Lo que dice, que el principio de la cedencia en la probeta se produce cuando la energía de distorsión alcanza valores críticos. Este criterio de falla es utilizado para el análisis de materiales dúctiles, la densidad de energía de distorsión debida a la acción de la carga multiaxial se determina con la ecuación [3].

$$\bar{U} = \frac{1}{2} [\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3] \quad (1)$$

parte de la energía de deformación se encuentra asociada con el cambio de volumen en la pieza o elemento mecánico. Así como, en el cambio de forma o distorsión. Si se considera el criterio de falla por energía máxima de distorsión, los esfuerzos causantes de la cedencia son los que a su vez causan la distorsión y estos son los esfuerzos cortantes. Por lo que, la cedencia del material dúctil se presenta cuando la energía de distorsión por unidad de volumen es igual o mayor que la energía de distorsión por unidad de volumen, cuando la probeta cede en una prueba a tensión simple y se enuncia en función de los tres esfuerzos principales según la ecuación [3].

$$\sigma_y^2 = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2] \quad (2)$$

### Influencia de las formas de los martillos de forjado

La fabricación de cañones de armamento está basada en el proceso de forjado en frío del material, mediante dados de compactación (Martillos) que inciden sobre el material del cañón a forjar y la herramienta interna que conforma el estriado interno y recamarado (Fig. 2). Los ángulos de perfil de los martillos de forjado tienen su razón en el hecho de que depende si la forja que se realizara será de un barril sin o con cámara de cartucho. Normalmente en el caso de forjado sin cámara de cartucho los cuatro martillos tienen una cara de golpe de martillo idéntica, por lo que en el mismo conjunto de martillos en el caso de altura y forma se mantienen uniformes en los ángulos y longitudes individuales (tolerancia de longitud en los pasos de Angulo  $\pm 0.05$  mm) [4].

Fig. 2. Esquema de un juego de martillos forjando un cañón

Cuando se forjan cámaras de cartucho, el proceso de forjado se lleva a cabo con dos formas de martillo en un conjunto forma A-B, (Fig. 3). Esta forma es necesaria debido al efecto de llenado en la entrada de material, ya que este aumenta al forjar una cámara de cartucho. Por lo que, en los martillos debe existir un ángulo de entrada que permita que no haya acumulación de material. (Fig. 4 y 5) [4].

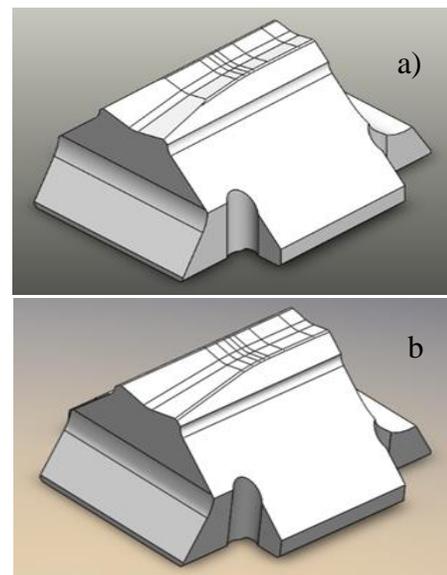


Fig. 3. Martillos de forjado tipo A y B

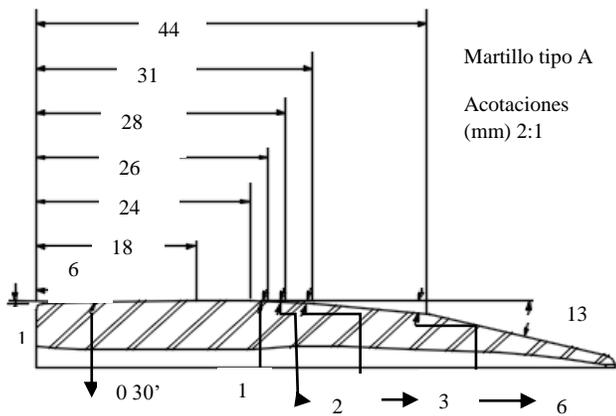


Fig. 4. Vista perfil angulado martillo tipo A

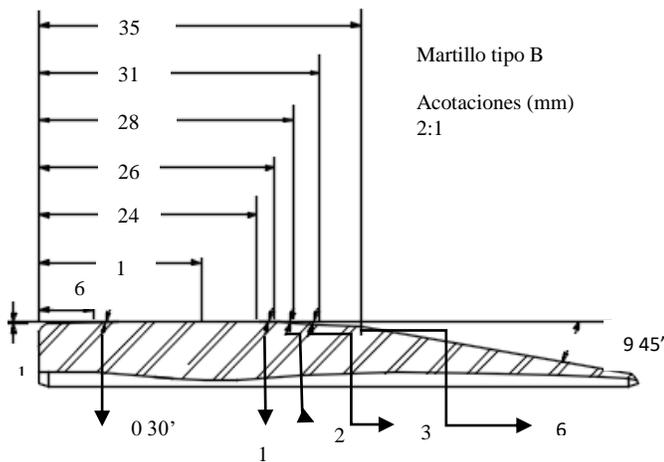


Fig. 5. Vista perfil angulado martillo tipo B

### Aplicaciones del MEF

Entre las aplicaciones que de forma mayoritaria se le da al Método del Elemento Finito en la industria recae en el cálculo de esfuerzos y deformaciones unitarias de sólidos y estructuras. Gran parte de los usuarios emplea el MEF para cálculo lineal ya sea estático o dinámico. En el uso práctico del Método del Elemento Finito generalmente se comienza enfocando el problema con preguntas como ¿Cómo será y que grado de complejidad tendrá el modelo?, ¿qué precisión se requiere en los resultados?, ¿cuántos elementos va a tener? Estas preguntas son formuladas a partir de que el usuario tiene varias opciones al enfrentar el problema. La decisión adecuada depende generalmente de los resultados obtenidos, capacidad y costo de los recursos computacionales. Un factor importante para tomar en cuenta es si el modelo puede ser simplificado a fin de ahorrar tiempo de análisis y elementos ejemplo de un factor de simplificación es la simetría de las piezas.

Entre las ventajas que se pueden mencionar al aplicar MEF en análisis estructurales, térmicos de fluidos, fatiga entre otros, se

puede mencionar la reducción en la elaboración de prototipos y de pruebas experimentales que se requieren para la validación de un diseño. Esto permite la mejora en el diseño y calidad además de minimizar riesgos de falla evaluando diversos diseños optimizándolos en un tiempo corto lo que reduce los costos operacionales. Las desventajas que se pueden presentar al usar el MEF son las geometrías complejas de algunos diseños. Por lo que, es necesario idealizar dichas geometrías esto implica que los resultados al resolver el modelo no sean tan precisos como se desea. Además, es necesario conocer muy bien los datos correctos del material a modelar, por ejemplo, el tipo de material, condiciones de contorno, sujeciones, cargas y restricciones aplicables al modelo.

### 2. Parte técnica del artículo

Las fuerzas que interactúan entre los martillos y el material del cañón durante el proceso de forjado son determinadas por el principio de funcionamiento y características de operación (Tabla I) de la máquina forjadora radial GFM SHK 10, (Fig. 6), la fuerza aplicada desde la caja de forjado hacia los martillos es de 750 kN (0.75MPa). Estos impactan y generan la deformación en el material del cañón esta fuerza es aplicada de manera alternante entre cada par de martillos.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA SK 10 PARA FABRICACIÓN DE CAÑONES (SEDENA)

Modelo	Sk-10
Sistema de forjado	Radial
Tipo de forjado	En frío
Golpes por minuto	1000
Fuerza de forjado	784.5 kN
Diámetro máximo de forjado	38 mm
Número de martillos	4
Longitud de la pieza forjada	750 mm
Peso de la máquina	25 t
Nivel de protección acústica	88 db a 10 m
Sistema de automatización	No aplica
Calibres que puede fabricar	9 mm. 5.56 mm. 7.62 mm.

2.- Cálculo: Se determino el área de restricción y de cargas en los modelos de martillo, la restricción del modelo se da en la sujeción de los martillos con la caja de forjado de la forjadora radial SHK 10. La carga aplicada al modelo del martillo es de 750 kN (0.75 MPa) y se aplica en una zona específica del perfil angulado del martillo que es donde se concentra la carga al estar en operación (Fig. 8). Mientras que las restricciones se aplican a los 6 grados de libertad, por lo que el modelo queda empotrado lo que no permite desplazamientos (Fig. 9)

Fig. 6. la maquina forjadora radial GFM SHK 10

#### A. Análisis de los martillos A y B por Método del Elemento Finito.

Se realizó el análisis por medio del Método del Elemento Finito a los dos modelos de martillo tipo A y tipo B, principalmente tomando el área del perfil de la herramienta, ya que es donde se presentan los problemas de deformación plástica, erosión y desgaste. Con lo que se buscó conocer el estado de esfuerzos al que se encuentran sometidos ambos martillos trabajando con las etapas siguientes:

1.- Pre-proceso: los modelos fueron discretizados con un mallado sólido basado en curvatura de elementos cuadráticos de alto orden, número total de elementos 23006, número total de nodos 35965 y tamaño de elemento de 0.00577032 m (Fig. 7). Con respecto a las propiedades del material se considera estructural, elástico, isotrópico, lineal con módulo de Young (E) 449GPa y relación de Poisson ( $\nu$ ) 0.24. Según datos del fabricante de los martillos trata de un carburo *CTF40 (WC/Co)* carburo de Tungsteno con un 20 % de Cobalto como aglomerante de tamaño de grano fino [5].

Fig. 8. Detalle del área de aplicación de la carga en el martillo de forjado

Fig. 9. Área de restricción de los martillos para análisis

3.- Post Proceso: Se procede al análisis de los resultados de cada uno de los modelos de martillos, según las figuras. 9 a 17

Fig. 7. Modelo de martillo con malla controlada fina en el perfil angulado

Fig. 10. Desplazamiento total martillo tipo A (mm)

Fig. 11. Esfuerzos de Von Mises martillo tipo A (MPa)

Fig. 15. Esfuerzos de Von Mises martillo tipo B (MPa)

Fig. 12. Esfuerzos de Von Mises mallado controlado martillo tipo A (MPa)

Fig. 16. Esfuerzos principales martillo tipo B (MPa)

Fig. 13. Esfuerzos principales martillo tipo A (MPa)

Fig. 17. Esfuerzos normales martillo tipo B (MPa)

Fig. 14. Desplazamiento total martillo tipo B (mm)

Fig. 18. Esfuerzos normales martillo tipo A (MPa)

**B. Análisis de resultados de los modelos de martillo de forjado.**

Se realizaron tres análisis de los martillos de forjado con cargas de 750 kN (0.75 MPa), para lo que se modificó el control de discretizado en la zona del perfil angulado en los tres casos. Con lo que se observó que existiera la convergencia en los resultados según se controló la malla en el área mencionada. Se obtuvieron resultados para esfuerzos de *Von Mises*, desplazamientos en los ejes X, Además de los esfuerzos principales como se muestra en la Tabla II.

TABLA II. RESULTADOS DEL ANALISIS NUMERICO DE LOS MARTILLOS DE FORJA TIPO A Y B

MARTILLO TIPO A		MARTILLO TIPO B	
Desplazamiento total (mm)	Desplazamiento en el eje X (mm)	Desplazamiento total (mm)	Desplazamiento en el eje X (mm)
0,000025391	2,5659E-06	0,000019151	1,9593E-06
0,000025361	2,6973E-06	0,000019154	1,8343E-06
0,000025386	2,6259E-06	0,000019152	1,75E-06
Esfuerzos Von Mises (MPa)	Max esfuerzo principal (MPa)	Esfuerzos Von Mises (MPa)	Max esfuerzo principal (MPa)
0,59182	0,18634	0,57115	0,20258
0,60907	0,23061	0,56723	0,18077
0,57176	0,23948	0,58551	0,18492

**3. Conclusiones**

Se muestran los resultados obtenidos en los 3 análisis dando prioridad a los valores máximos en los tres casos (Tabla II). ya que con estos valores se representan el estado de esfuerzos actual de la herramienta se procederá a suavizar el perfil angulado de los martillos. Lo que gradualmente modificará la geometría y por lo tanto se buscará reducir y optimizar el estado de esfuerzos de los martillos de forjado. Se considera además que, en el caso del análisis numérico debido al control de malla aplicado a zonas donde existen aristas y redondeos. Así como en el área de las aristas del perfil angulado se logra mayor convergencia en los resultados obtenidos.

En base a los estudios realizados con anterioridad sobre el diseño y desarrollo de herramientas para fabricación de cañones de armamento [6] y la manera en que interactúan los martillos de forjado con las herramientas de suajeado se valida el presente estudio en la obtención del estado de esfuerzos al que se encuentra sometida la herramienta en este tipo de

operaciones. La siguiente fase del estudio consistirá en modificar el perfil de trabajo de los martillos de forjado a fin de reducir los esfuerzos y desplazamientos en esa zona especialmente, con lo que se buscará además de la optimización de la herramienta una redistribución de esfuerzos en el área del perfil angulado de los martillos. trabajo que se desarrollará En trabajos futuros.

**4. Agradecimientos**

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Fábrica de armas de la SEDENA y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

**5. Referencias**

- [1] V. F. verdusco cedeño, “diseño y desarrollo de herramientas de suajeado para la fabricación de cañones de armamento,” instituto politecnico nacional.M. en C. Tesis SEPI-ESIME ZACATENCO pp 2-11, 2010
- [2] V. F. verdusco cedeño, “determinación del comportamiento mecánico de materiales empleados en los procesos de forjado y torneado.”Ph,d Tesis SEPI-ESIME ZACATENCO pp.55-66, 68-72, 91-93
- [3] T. Altan and G. Ngaile, *Cold and Hot Forging*, Fundamentals and applications, ASM international pp. 50-54, 2005.
- [4] R. Barrels, “Cold Forging,” With and without cartridge chamber no. January, 1995.
- [5] Catalogo No. 272 ES 11.12, “*Hard material matters*”, CERATIZIT, Luxembourg Sarl Route de Holzem 101.
- [6] F. Zhu, Z. Wang, and M. Lv, “Multi-objective optimization method of precision forging process parameters to control the forming quality

**5. Biografías**

**M. en C. Antonio Hernández Cerón** es Ingeniero en Robótica Industrial con Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica con opción Diseño Mecánico, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional.

**Dr. Víctor Fernando Verdusco Cedeño** es Ingeniero Industrial egresado de la Escuela Militar de Ingenieros, con Especialidad, Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica opción diseño mecánico. Egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, actualmente es Jefe de Producción de la Fabrica de Armas dependiente de la Dirección General de Industria Militar de la SEDENA.

**Dr. Guillermo Urriolagoitia Sosa** es Ingeniero Mecánico con Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica con opción en Diseño Biomecánico, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Maestro en Ciencias de la Universidad de Oxford del Reino Unido con especialidad en fatiga por frotamiento. Doctorado en Filosofía de la Universidad de Oxford Brookes del Reino Unido con especialidad en Esfuerzos Residuales. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

**Dra. Beatriz Romero Ángeles:** Ingeniero Mecánico con Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica con opción en Diseño Biomecánico, egresada de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente es profesora investigadora en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica Azcapotzalco, del Instituto Politécnico Nacional, México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

**Dr. Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón** es Ingeniero Mecánico con Especialización Docente egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional. Cuenta con Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica egresado del Imperial college of Science and Technology, y Doctorado en Filosofía en Mecánica de la Fractura egresado de la Universidad de Londres (strathclyde). Actualmente es Profesor Investigador en la Sección de Estudios de Posgrados e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional y miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

**Dr. Christopher Rene Torres San Miguel** es Ingeniero en Robótica Industrial con Maestría y Doctorado en Ciencias en Ingeniería Mecánica egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional. Actualmente es Profesor Investigador en la Sección de Estudios de Posgrados e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Zacatenco del Instituto Politécnico

# Influencia de patrones de flujo en predicción de caídas de presión en instalación experimental de flujo en dos fases

E. E. Vázquez-Ramírez<sup>1,a</sup>, E. García-Sánchez<sup>1</sup>, I. Urbina-Salas<sup>1</sup>, L. M. Morales de Anda<sup>1</sup>, J. M. Riesco-Ávila<sup>2</sup> L. Canizalez-Dávalos

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato.

<sup>2</sup> Universidad de Guanajuato, Depto. de Ingeniería Mecánica

<sup>2</sup> Universidad de Zacatecas, Depto. de Ingeniería Química

<sup>a</sup> evazquezr@itesg.edu.mx

**Resumen**—En este trabajo se realizó un estudio de las caídas de presión de una estructura experimental de flujo en dos fases y los resultados de 650 experimentos se compararon con los patrones de flujo presentes en cada uno de ellos.

Se generaron diferentes patrones de flujo variando la cantidad de flujos de aire y de agua que se ponen en contacto en un área de pruebas y fueron registrados mediante una cámara de alta velocidad, se realizó el análisis y procesamiento de imágenes a los videos para determinar el porcentaje de área observada de cada fase e identificar los patrones de flujo. La caída de presión se midió experimentalmente y se comparó con ecuaciones de caída de presión más utilizadas. Se encontró que la configuración geométrica del flujo afecta directamente la caída de presión e impide tener una ecuación única y global para todo el rango de flujo en dos fases.

*Palabras clave.* Patrones de flujo, caída de presión, flujo en dos fases

## 1. Introducción

El flujo en dos fases, conocido también como bifásico, se presenta cuando fluye por un conducto conjuntamente líquido y gas, en condiciones que pueden ser con transferencia de calor y presentarse condensación o evaporación. El flujo en dos fases sucede en procesos de evaporación, criogenia, atomización, enfriamiento de dispositivos electrónicos y en prácticamente toda industria petrolera, nuclear, química entre otras.

Si se plantean las ecuación de conservación de cantidad de movimiento para ambas fases fluyendo conjuntamente, su solución rigurosa presenta una gran complejidad debido a la naturaleza impredecible de los flujos ocasionada por factores como la compresibilidad de la fase gaseosa, distorsión de la interfase, procesos de difusión de masa y energía, velocidades relativas de cada fase, determinación de propiedades físicas y también de la forma que van tomando cada una de las fases de acuerdo a las velocidades y que provocan cambios en la distribución espacial de cada fase durante el flujo, así como al tamaño, rugosidad y orientación de los canales de flujo.

El estudio del flujo en dos fases históricamente se ha realizado en dos vertientes principales dependiendo del modelo que se aborde que son las siguientes:

**Modelo de Flujo Homogéneo:** Se aplican las ecuaciones de flujo como si se tratara de un fluido de una sola fase el cual tiene propiedades físicas que son combinación de las fases líquida y gaseosa y que se mueve en conjunto con la misma velocidad.

**Modelo de Flujo Separado:** Las fases líquida y gaseosa se analizan por separado y se reconoce que cada una puede tener velocidades y propiedades físicas diferenciadas.

A pesar de los numerosos esfuerzos que existen en desarrollo de estos dos modelos, aún no se tienen correlaciones termohidráulicas que sean lo suficientemente efectivas y de aplicación global para cada una de las condiciones en que se puede encontrar el flujo en dos fases, por lo que existen otros estudios que toman en cuenta las interacciones de las fases. Uno de estos es llamado estudio de regímenes o patrones de flujo donde el flujo en dos fases se analizará tomando en cuenta la forma física que toman cada una de las fases al fluir juntas por un canal o tubería, [1, 2], estos patrones de flujo se describirán también.

Los estudios basados en este último modelo necesitan identificar como va evolucionando la transición de regímenes de flujo de tal manera que se pueden clasificar en los siguientes grupos [3]:

- Observación Visual.
- Evolución de la fracción de vacío (void fraction).
- Cálculo de calidad de acuerdo a la hidrodinámica.
- Técnicas avanzadas de medición.

Se tiene una instalación experimental desarrollada como prototipo de un intercambiador de calor interno para una torre de destilación de platos, en la cual se estudia el comportamiento termohidráulico, principalmente la caída de presión. Al utilizar los modelos más conocidos y aplicados existentes en la literatura para predecir la caída de presión se encontraron variaciones importantes con la caída de presión medida durante los experimentos. Esta es la razón por la cual se realiza un análisis del comportamiento del flujo dentro de la zona de dos fases.

Se compara la eficiencia de predicción de la caída de presión obtenida por correlaciones teóricas basadas en el modelo homogéneo con los valores obtenidos experimentalmente, los datos se correlacionarán con las características geométricas que el flujo presenta en cada experimento mediante la identificación de su patrón de flujo y se determinará el grado de confianza en la aplicación de dicha correlación para nuestro sistema.

## 2. Antecedentes

### A. Estudio del flujo en dos fases

Entre los estudio más recientes de flujo en dos fases, los más numerosos se concentran en el estudio de flujo en microcanales según la clasificación de Kandlikar & Grande

[4], sin embargo la importancia y las aplicaciones de los minicanales y pequeños canales son muchas tales como tubos de vapor en rehervidores, evaporadores compactos, intercambiadores de calor compactos etc., estos equipos se aprovechan la transferencia de calor del flujo en ebullición dentro de los tubos que puede llegar a ser muy alto y eficiente.

Para el diseño de estos equipos térmicos es necesario predecir de manera lo más eficiente posible el coeficiente de transferencia de calor, también la caída de presión, los regímenes de flujo y las inestabilidades que presenta el flujo en dos fases. Dentro de los estudios realizados a los flujos en minicanales se han estudiado exhaustivamente los patrones de flujo en dos fases, Triplett y col. [5] investigaron los patrones de flujo y su relación con las caídas de presión en minicanales sin resultados concluyentes. Mishima y Hibiki [6] efectuaron experimentos utilizando mezcla de aire-agua en diámetros de 1.05 a 3.90 mm y lo correlacionaron con el modelo drift flux con parámetros específicos únicamente para esta mezcla.

Entre los estudios utilizando identificación con cámaras de visión, Damianides y Westwater [7] mediante cámaras de alta velocidad utilizaron tubos de cristal para observar la fase con un diámetro de 1 a 5 mm, Rysak y col. [8] investigaron los patrones de flujo aire-agua en un minicanal de 5 mm en diferentes direcciones utilizando una cámara de alta velocidad para hacer el análisis de correlaciones tipo Euler de espacio-tiempo.

Li & Wu [9] and Zhang y col. [10] propusieron nuevas correlaciones más generales para el cálculo de la caída de presión que abarcara todos los regímenes de flujo. Mosdorf y Górski [11] realizaron un análisis en minicanales cuadrados para el cálculo de coeficientes para determinar la caída de presión usando métodos no lineales y [12] realizaron la identificación de patrones de flujo en minicanales cuadrados usando análisis recurrente de cuantificación (RQA) y análisis de componente principal (PCA). Kurimoto y col. [13] hicieron estudios del patrón de flujo tipo bala con cámara en alta velocidad para flujo en microcanales midiendo la velocidad de cada fase y calculando la caída de presión.

### B. Patrones de Flujo

Los patrones de flujo se denominan a la configuración geométrica que adopta el flujo en dos fases dentro de un canal. Para el flujo ascendente en tuberías verticales se reconocen 5 patrones de flujo, aunque la cantidad varía de acuerdo a los investigadores. El modelo real dependerá en cada caso principalmente de la velocidad de flujo y de las cantidades relativas de líquido y gas.

Los patrones de flujo se presentan en la figura 1 y se describen a continuación:

- Burbuja: Este patrón presenta un flujo de pequeñas burbujas de gas inmersas en fase líquida.
- Burbuja-Bala: Es una transición entre los flujos de burbuja y Bala, se caracteriza por burbujas de la fase gaseosa inmersas en la fase líquida.
- Bala: La fase gaseosa forma tapones con forma de Bala con un diámetro muy aproximado al de la tubería, una característica de este tipo de flujo es que la parte superior de la Bala es esférica y están separadas por una pequeña capa de la fase líquida.
- Semianular: Es un flujo irregular e inestable debido a las fluctuaciones en la formación de burbujas irregulares de gran tamaño que se unen y se separan constantemente. El flujo del líquido tiende a estar cerca de la pared.
- Anular disperso: En este patrón se puede apreciar una película relativamente gruesa de la fase líquida cercana a las paredes de la tubería, mientras que en el centro de la tubería viaja la fase gaseosa acompañada de pequeñas gotas de líquido.
- Anular: En este caso es posible observar que las fases están completamente separadas, donde la fase gaseosa se encuentra en la parte central de la tubería. En ocasiones se puede observar arrastré de pequeñas gotitas que se desprenden de la fase líquida debido a perturbaciones en esta fase.

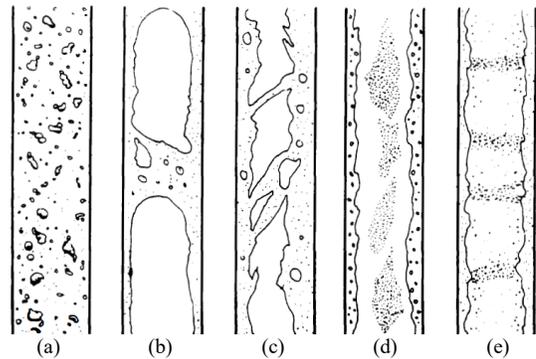


Fig. 1. Patrones de flujo en ductos verticales (a)Burbuja, (b)Bala, (c)Semianular (d)Anular disperso y (e)Anular.

### C. Desarrollo

Para este análisis se trabajó con flujo combinado de aire agua únicamente en dirección vertical ascendente en un equipo de pruebas de determinación de caída de presión en dos fases.

Para el análisis presentado aquí se utilizó la siguiente metodología:

1. Se realizaron varias mediciones de la instalación de prueba de acuerdo a los requerimientos de nuestro proceso de operación, efectuándose 650 experimentos, se mide y registra la caída de presión real en cada experimento.

2. Se identificaron los patrones de flujo presentes en cada experimento, de manera visual y con procesamiento de imágenes.
3. Hecha la identificación de patrones de flujo se hace un mapa de flujo identificando las regiones donde se presenta cada patrón.
4. Se calcula la caída de presión teórica mediante modelos establecidos.
5. Se determina el error que existe al comparar la caída de presión real con la teórica
6. Se correlacionan los resultados de error con los patrones de flujo y se estudia la tendencia.
7. Se observa la influencia de los patrones de flujo en las corridas experimentales.

#### D. Instalación experimental

Originalmente construida como un equipo de pruebas que proporciona flujo en dos fases, donde se estudia la viabilidad para un intercambiador de calor interno de contacto directo [14], la instalación experimental está ubicada en el laboratorio de Ingeniería Mecánica del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Guanajuato, se muestra en la Figura 2. El sistema está diseñado con un área de prueba de material transparente que permitió identificar los patrones de flujo que se generan en el área de prueba.

El sistema consta de las siguientes especificaciones:

- Área de prueba de flujo en dos fases (Tubo de cristal de 9 mm de diámetro interno y 0.87 m de longitud)
- Columna de agua (Tubo de acrílico graduado de 5.7 cm de diámetro interno y 0.99 m de longitud).
- Tanques contenedores A, B, C, D.
- Rotámetro de aire con rango de operación de 0-13 L/min.
- Tubo de acero para alimentación de aire.
- Tubería de distribución de CPVC ½".
- Sistema de recirculación
- Manómetro digital con rango de operación de 0-30 psi.
- Termómetro

El funcionamiento de la instalación experimental consiste en hacer circular agua desde el Tanque A al mezclador para producir el flujo en dos fases en la zona de pruebas, en el mezclador entra aire a través de una boquilla que impulsa al flujo combinado, una vez que el flujo a dos fases abandona la zona de prueba en el Tanque C se separa el agua y pasa al Tanque D, el cual está conectado con el tanque de recirculación (Tanque B), este último cuenta con dos líneas de flujo hacia el Tanque A, una de alimentación y otra de drene con la finalidad mantener el nivel del Tanque A constante.

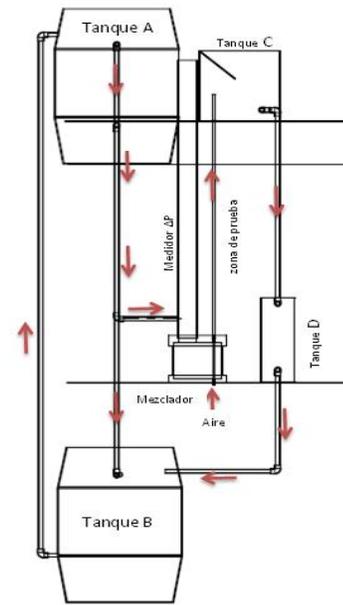


Fig. 2. Instalación experimental de flujo a dos fases.

#### E. Datos experimentales

La obtención de los datos experimentales se realizó fijando el valor del flujo de aire y variando el flujo de agua hasta condiciones de estabilidad y se midió la caída de presión. Se establece un nuevo valor de flujo de aire y se varía nuevamente el flujo de agua nuevamente. Se realizaron 650 experimentos controlando flujos y registrando condiciones de operación para calcular las propiedades físicas.

En la Tabla 1 se muestran los rangos de los valores de los datos experimentales de las velocidades superficiales de ambas fases así como sus números de Reynolds y la caída de presión.

Tabla 1. Valores máximos y mínimos de los flujos de aire y agua

Variable	Máximo	Mínimo
$j_{sq}$ [m/s]	3.67	0.26
$j_{sl}$ [m/s]	0.76	0.23
$Re_q$	8982	435.50
$Re_l$	7391	2278
$\Delta P$ [Pa]	9141	3902

Cada uno de los experimentos fue registrado por la cámara rápida FASTCAM-PCI R2 en cada tercio de la sección de prueba a razón de 400 cuadros por segundo. Durante el proceso de obtención de datos se obtuvieron los siguientes patrones de flujo bien definidos: burbuja-bala, bala, semianular, anular disperso y anular, en la Figura 3 se presenta la visualización de los patrones de flujo realizada mediante la cámara rápida.

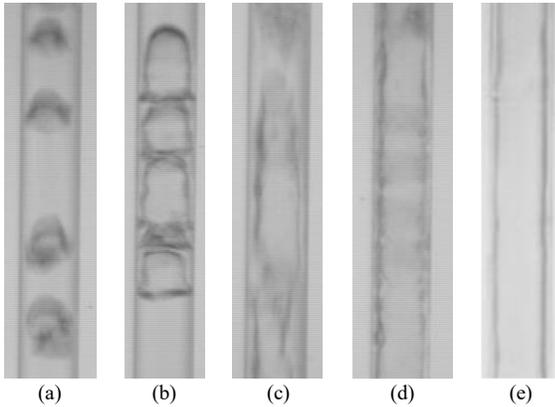


Fig.3 Visualización de patrones de flujo en ductos experimental vertical tomados con la cámara rápida FASTCAM-PCI R2. Se presentan los siguientes patrones (a) Burbuja-Bala, (b) Bala, (c) Semianular (d) Anular disperso y (e) Anular.

#### F. Identificación de patrones de flujo en los experimentos

Se identificó el patrón de flujo de cada experimento mediante el análisis de los videos de alta velocidad tomados en cada tercio de la sección de pruebas.

Se puso en marcha un sistema de identificación mediante procesamiento de imágenes para identificar el patrón de flujo presente utilizando el área que correspondiera a fase líquida y el área que correspondiera a fase gaseosa con la finalidad de hacer más rápido el proceso. El programa realiza un porcentaje de área para cada fluido obteniendo como resultado el porcentaje correspondiente a cada componente.

Los resultados del procesamiento de imagen se presentan en la tabla 2, indicando el porcentaje del área que ocupa el aire y el porcentaje de área que representa el líquido

**Tabla 2 – Rangos de área ocupado por cada fase (aproximados)**

Régimen	% fase Líquido	% fase Gas
*Burbuja	>85	<15
Bala	55-75	25-45
Semi-Anular	35-55	45-65
Anular	10-35	65-90
*Niebla	<10	>90

Debido a la cantidad de experimentos, el procesamiento de imágenes se ha utilizado hasta ahora únicamente para comprobar el mapa de flujo presentado por Vázquez y col. [14].

#### G. Mapa de flujo

A pesar las múltiples investigaciones realizadas, [15, 16], la predicción de cual patrón de flujo se presentará en un determinado canal es compleja debido a la cantidad de condiciones que afectan o determinan la configuración geométrica. Para tratar de ayudar a la predicción de patrones de flujo se han desarrollado mapas de flujo que no es más que un arreglo ya sea adimensional o de un factor calculado, como

la velocidad superficial de cada fase. Se presentan mapas de flujo para cada disposición y orientación de flujo ya sea ascendente, descendente, vertical, horizontal.

De los mapas de flujo disponibles en la literatura [15], ningún mapa se ajustó a nuestros datos experimentales, debido a las condiciones de operación y a las dimensiones principalmente el diámetro del canal de prueba, por lo que se realizó un mapa de flujo específico para nuestro sistema [14]. Se diseñaron los patrones de flujo de acuerdo a los mapas de Hewitt y Roberts [17] y Fair, J. R. [18] que permiten identificar el tipo de flujo que se presenta en el tubo y además cuando se presentará la transición a otro patrón, dichos mapas se realizaron de acuerdo a los siguientes parámetros:

a) Calidad de vapor,  $x$ , masa de gas y de líquido  $m_g, m_l$

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_l} \quad (1)$$

b) Flujo másico por unidad de área,

$$G = G_g + G_l = \frac{\dot{m}}{A} = \frac{m_g + m_l}{A} \quad (2)$$

c) Flujo de momento superficial,

$$\rho_l j_l^2 = \frac{[G(1-x)]^2}{\rho_l} \quad (3)$$

$$\rho_g j_g^2 = \frac{[Gx]^2}{\rho_g} \quad (4)$$

En la figura 4 se muestra el mapa de flujo utilizando los parámetros de Hewitt y Robert [17] se presentan los mapas de flujo realizado a nuestros experimentos, el acomodo de los patrones de flujo es semejante al mapa original, presentándose el flujo burbuja-bala en la parte inferior derecha, flujo semianular por encima del flujo tipo bala y el flujo anular presentándose en la parte superior el mapa. Otros patrones de flujo no se presentaron en la región experimental, como el flujo burbuja o el flujo tipo neblina.

#### H. Caídas de presión de flujo en dos fases adiabático

La caída de presión en flujo en dos fases está formada por tres componentes. La caída de presión por fricción debido al propio movimiento del fluido, la caída de presión por aceleración que es el cambio de energía cinética de los fluidos debido al cambio de densidad, la caída de presión estática por cambio de elevación del fluido.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{total} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_f + \left(\frac{dP}{dz}\right)_a + \left(\frac{dP}{dz}\right)_g \quad (5)$$

Como no existe un cambio evidente de la temperatura durante el experimento por el corto tiempo de contacto, la densidad se

considera igual para cada fase y la caída de presión por aceleración se desprecia.

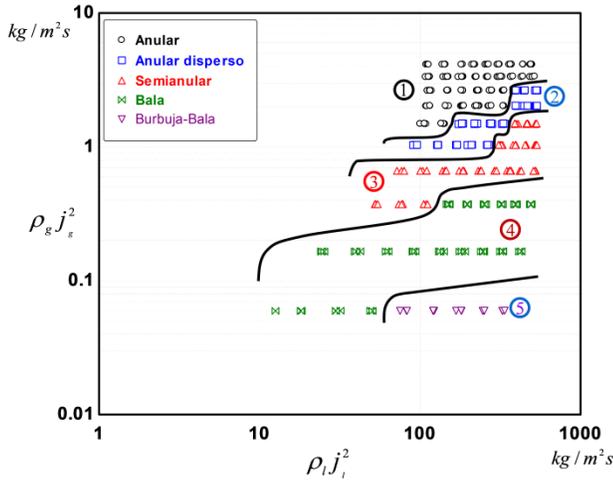


Figura 4. Mapa de flujo de instalación experimental [14].

Para comparar la caída de presión experimental con la calculada vía una correlación se utilizará el modelo homogéneo que ha sido el que mejor se adapta a condiciones generales [19] se utilizaron las siguientes expresiones para su cálculo

a) Caída de presión total

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{total} = f_{tp} \frac{\rho_{tp} j_{tp}^2}{2D} + g \rho_{tp} \text{sen}\theta \quad (6)$$

Para las propiedades físicas se utilizarán las fórmulas de Cicchitti et al. (1960) [20]

b) Viscosidad del flujo en dos fases

$$\mu_{tp} = \mu_g x + \mu_l (1 - x) \quad (7)$$

c) Densidad de flujo en dos fases

$$\rho_{tp} = \rho_g x + \rho_l (1 - x) \quad (8)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la tubería,  $f_{tp}$ ,  $\rho_{tp}$  y  $j_{tp}$  son el factor de fricción de Colebrook, la densidad y la velocidad de la mezcla, respectivamente, y  $\theta$  es el ángulo de inclinación de la tubería respecto a la horizontal.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 3.48 - 1.7373 \ln \left( \frac{2e}{D} + \frac{9.35}{Re_{tp} \sqrt{f_{tp}}} \right) \quad (9)$$

La velocidad de la mezcla se determina mediante las siguientes ecuaciones:

$$j_{tp} = j_{sl} + j_{sg} \quad (10)$$

$$j_{sl} = \frac{Q_l}{A} \quad (11)$$

$$U_{sg} = \frac{Q_g}{A} \quad (12)$$

donde  $j_{sl}$  y  $j_{sg}$  representan las velocidades superficiales del líquido y del gas, respectivamente y siendo  $j_l$  y  $j_g$  los flujos volumétricos de las fases líquida y gaseosa, respectivamente, y  $A$  el área de la sección transversal del tubo.

## I. Resultados

En la figura 5 se muestra la comparación de la caída de presión calculada con la experimental, también se identifica el patrón de flujo existente en cada punto. La gráfica presenta en el eje vertical la relación de la caída de presión calculada entre la obtenida experimentalmente al ir aumentando el número de Reynolds de las dos fases (eje horizontal).

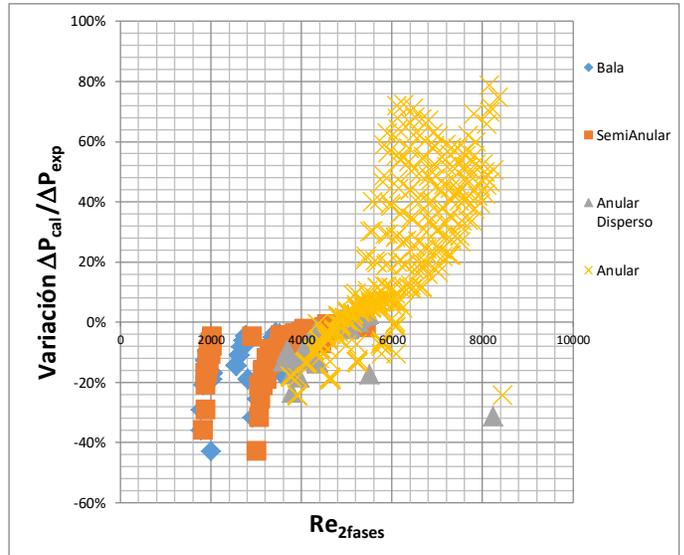


Figura 5. Variación  $\Delta P_{cal}$  con  $\Delta P_{exp}$  para cada régimen de flujo

En nuestros resultados tenemos las siguientes observaciones previas:

- Los patrones de flujo correspondientes a tipo burbuja se presentaron solo en dos experimentos por lo que por cantidad no son representativos.
- Los experimentos que presentan el patrón de flujo burbuja-bala no se consideraron de manera separada por ser muy pocos (8) para ser concluyentes y se incluyeron en los datos de flujo tipo bala

En la tabla 3 se muestran las desviaciones estadísticas de las variaciones de los datos experimentales y los calculados, los parámetros de error E1, E2, E3 y E4 son error porcentual, error porcentual absoluto promedio, desviación estándar del error porcentual promedio y la raíz del error porcentual promedio cuadrado (RMSP) respectivamente.

**Tabla 3. Desviaciones estadísticas de los datos experimentales**

Patrón de flujo	Datos	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>
Bala	100	-10.7%	10.7%	7.11%	12.9%
Semi Anular	71	-7.32%	7.32%	6.11%	9.57%
Anular Disperso	89	-5.98%	6.92%	7.22%	9.39%
Anular	388	16.8%	21.5%	24.6%	29.8%
Rango completo	650	6.7%	16.3%	23%	24%

#### J. Análisis de Resultados por tipo de patrón de flujo:

La caída de presión calculada se ha visto afectada por el patrón de flujo presente en los experimentos de acuerdo al estudio realizado. Analizando cada uno de los patrones se tienen las siguientes observaciones por tipo de flujo

**Flujo Bala:** Se observa en la figura 5 que al comparar la correlación teórica con la experimental siempre hay valores teóricos por debajo de los experimentales (subpredicción de caída de presión), con algunos puntos con variaciones de 20 a 40% de desviación y un promedio de -10.7%.

**Flujo Semianular:** También en este patrón de flujo se presenta subpredicción de la correlación teórica prácticamente en toda la región donde se presenta pero con promedios de variación de -7.32% que lo hace bastante utilizable.

**Flujo Anular Disperso:** La mayoría de los valores teóricos caen debajo de los datos experimentales pero ya se presentan valores por encima de los experimentales

**Flujo Anular:** Es el flujo que más se presenta en nuestros experimentos, y que en cuestiones de transferencia de calor debe evitarse, los valores de caída de presión teóricos están por arriba de los experimentales en la gran mayoría de los datos, se tienen puntos por encima del 50% por lo que no se recomendaría su aplicación.

Para todos los casos se observa que la sobre predicción de la caída de presión tiene una tendencia ascendente respecto al número de Reynolds que coincide con el cambio de patrón de flujo por lo que se puede buscar una correlación específica para nuestra instalación experimental donde el número de Reynolds puede tener un ajuste adicional para calcular la caída de presión.

La sobrepredicción de los valores de caída de presión puede deberse a factores geométricos ya que el flujo anular presenta una configuración donde el líquido va formando una capa laminar alrededor de las paredes del canal pequeño y el vapor va por el centro, por lo que la interacción entre las fases es muy pequeña y no presentan deformaciones en el flujo ascendente.

Se puede ver que la desviación más grande de los valores teóricos con los experimentales se debe a la presencia de flujo anular, y que para la predicción en la caída de presión de un

flujo en dos fases es correcto aplicar un modelo homogéneo si el patrón de flujo es tipo Bala, Anular Disperso y Semianular.

### 3. Conclusiones

En la instalación de pruebas de flujo en dos fases se lograron obtener 5 patrones de flujo que fueron grabados con una cámara de alta velocidad, se utilizó un proceso automático de obtención de fotogramas del video y se analizó el área de cada flujo. Se concluyó que existe una manera de medir el área de flujo de cada fase y que es posible relacionarlo con los patrones de flujo.

Se midió la caída de presión de manera experimental y se obtuvieron datos de temperatura, presión atmosférica y condiciones de flujo para calcular la caída de presión utilizando una de las correlaciones más efectivas que es la correlación de modelo de flujo homogéneo.

La comparación del modelo experimental y teórico indica que para nuestro canal pequeño de prueba, es posible aplicar el modelo homogéneo con una desviación aceptable para regímenes de flujo tipo Bala, Semianular y Anular disperso, aunque el modelo homogéneo utilizado consistentemente se quedó por debajo de los resultados experimentales para estos regímenes de flujo. En el caso del flujo Anular, el modelo homogéneo calcula una caída de presión en algunos casos hasta del 80% mayor, esto debido a la configuración geométrica y la poca interacción entre las fases cuando se presenta este patrón de flujo.

La predicción de la caída de presión en la instalación experimental no es posible utilizando alguna ecuación que no considere el patrón de flujo ya que las interacciones de las fases son fundamentales.

### 4. Referencias

- [1] G. F. Hewitt y N. S. Hall-Taylor, *Annular Two-Phase flow*, New York: Pergamon Press, 1969.
- [2] Y. Taitel, D. Bornea y A. E. Dukler, «Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes,» *AIChE J.*, n° 26, pp. 345-354, 1980.
- [3] S. Ashfaq, H. Muthanna y Al-Dahhan, «A Review on flow Regime Transition in bubble Columns,» *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 5, n° 1, pp. -, 2007.
- [4] S. Kandlikar y W. Grande, «Evolution of micro-channel flow passages thermohydraulic performance and fabrication technology,» *Heat Transfer Eng.*, n° 25, pp. 3-17, 2002.
- [5] K. Triplett, S. Ghiaasiaan y S. Abdel-Khalik, «Gas-liquid two-phase flow in microchannels part I: two-phase flow patterns,» *Int. J. Multiphas. Flow*, n° 25, p. 377-394, 1999.
- [6] K. Mishima y T. Hibiki, «Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes,» *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 22, n° 4, pp. 703-712, 1996.
- [7] C. Damianides y J. Westwater, «Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes,» de *Proc. 2nd UK Natn Conf. on Heat Transfer*, 1988.
- [8] A. Rysak, G. Litak, R. Mosdorf y G. Gorski, «Investigation of two-phase flow patterns by analysis of Eulerian space-time correlations,» *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 85, pp. 23-37, 2016.

- [9] W. Li y Z. Wu, «A general correlation for adiabatic two-phase pressure drop in micro/mini-channels,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, n° 53, p. 2732–2739, 2010.
- [10] W. Zhang, T. Hibiki y K. Mishima, «Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel,» *Int. J. Heat Mass Transf*, n° 53, pp. 453-465, 2010.
- [11] R. Mosdorf y G. Gorski, «Detection of two-phase flow patterns using the recurrence network analysis of pressure drop fluctuations,» *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, n° 64, pp. 14-20, 2015.
- [12] R. Mosdorf y G. Gorski, «Identification of two-phase flow patterns in minichannel based on RQA and PCA analysis,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 96, pp. 64-74, 2016.
- [13] R. Kurimoto, K. Nakazawa, H. Minagawa y T. Yasuda, «Prediction models of void fraction and pressure drop for gas-liquid slug flow in microchannels,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 88, pp. 124-133, 2017.
- [14] E. E. Vázquez-Ramírez, G. T. Polley, J. M. Riesco-Ávila, C. O. Ríos-Orozco y A. A. Aguilar-Moreno, «Desarrollo de Intercambiadores de Calor como remplazo de Platos en Columnas de Destilación,» de *Memorias del xviii congreso internacional anual de la somim*, Salamanca, 2012.
- [15] L. Cheng, G. Ribatski y J. R. Thome, «Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications,» *Applied Mechanics Reviews*, vol. 61, 2008.
- [16] N. Pinto del Corral, «Analysis of Two-Phase Flow Pattern,» Brno University of Technology, Brno, 2014.
- [17] G. F. Hewitt y D. N. Roberts, «Studies of Two-Phase Flow Patterns by Simultaneous Flash and XRay Photography,» AERE-M2159, 1969.
- [18] J. R. Fair, «What you need to design thermosyphon reboilers,» *Petroleum Refiner*, 39: No. 2, pp. 105., vol. 39, n° 2, p. 105, 1960.
- [19] M. V. Sardeshpande, P. Shastri y V. V. Ranade, «Two-phase flow boiling pressure drop in small channels,» *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 61, pp. 636-649, 2016.
- [20] A. Cicchitti, C. Lombardi, M. Silvestri, G. Soldaini y R. Zavattarelli, «Two-Phase Cooling Experiments-Pressure Drop, Heat Transfer and Burnout Measurements,» *Energy Nucl.*, vol. 7, n° 6, pp. 407-425, 1960.

la recuperación de energía solar, diseño de intercambiadores de calor compactos, redes de intercambio de calor y simulación dinámica y computacional de fluidos en el Grupo Heat Transfer Technology de la Universidad Autónoma de Zacatecas

## 5. Biografías

**Vázquez Ramírez Edgar Enrique.** Doctor en Ingeniería Mecánica y estudios en Ingeniería Química, por la Universidad de Guanajuato, especializado en termofluidos y diseño de equipo térmico en dos fases, así como integración energética Profesor en la carrera de Mecatrónica en el ITESG.

**García Sánchez Ernesto,** cursó sus estudios de licenciatura y maestría en ingeniería en la Universidad de Guanajuato; y obtuvo su Doctorado en Ciencias en el Centro de Investigaciones en Óptica. Actualmente está adscrito al Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato con actividades en la carrera de Ing. Mecatrónica.

**Urbina-Salas Ismael** Ingeniero en mecatrónica en la Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, en 2009. Maestro en Ingeniería Eléctrica en el Instituto Tecnológico Superior de Irapuato, Guanajuato, en 2016. Actualmente es profesor titular en el departamento de Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Guanajuato. Sus líneas de interés incluyen el análisis de calidad de energía y procesamiento de señales.

**Canizalez Dávalos Lázaro** Doctor en Ingeniería Mecánica por la Universidad de Guanajuato en el área de Procesos Térmicos. Ha participado como consultor en el diseño y simulación de plantas petroquímicas para la recuperación de gas combustible. Su área de interés, es simulación, diseño y análisis de equipo térmico. Actualmente trabaja en sistemas energéticos para

# Simulación Cooperativa de un Gripper Agro-flexible

M. A. Pérez<sup>1,a</sup>, H. León<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica del Valle de México, Posgrado en Ing. de manufactura, División de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> [ing.miguel.perez.upvm@gmail.com](mailto:ing.miguel.perez.upvm@gmail.com), <sup>b</sup> [h.leon@cinvestav.mx](mailto:h.leon@cinvestav.mx)

**Resumen**— En la actualidad las operaciones de sujeción a través de robots requieren de niveles específicos de adaptación, es decir, el manejo adecuado de objetos, volúmenes y geometrías complejas, dichos factores son fundamentales para la cosecha de frutas en masa, a bajo costo y con buena calidad, la investigación en la recolección automatizada de ese tipo de alimentos es limitada debido a la complejidad en el agarre de estos objetos, además de ser productos recolectados principalmente por el ser humano. Al elaborar un prototipo de gripper es necesario realizar pruebas de funcionamiento. En este trabajo se muestra la simulación cooperativa de un gripper Agro-flexible elaborado con la técnica de modelado por deposición fundida mediante el enfoque basado en pruebas. El desarrollo se sustenta en el uso de un middleware para generar una interfaz SolidWorks-LabVIEW-Arduino. En los resultados se muestran la interfaz y el prototipo de gripper realizados.

*Palabras clave.* Gripper, Interfaz, Simulación cooperativa, Manufactura Aditiva.

## 1. Introducción

Hoy en día la automatización se encuentra en un sin número de artículos y productos que facilitan la vida del ser humano, mejorando los procesos y favoreciendo una mayor calidad en ellos. De igual manera el uso de robots está presente en muchas de las prácticas en diversos sectores dentro de la industria, esto da la posibilidad de mejorar muchos sectores, incluyendo el agroalimentario que cuenta con un enorme potencial para la implementación de estos métodos en operaciones de pick and place, posicionamiento en pallets, sistemas intermedios de almacenamiento de productos, clasificación, manipulación por empuje o colocación de bandejas [1].

Para la manipulación de productos agroalimentarios con robots es necesario comprender su diversidad y complejidad, puesto que el sistema de sujeción es clave para el manejo de objetos a alta velocidad, de sus características dependerá en gran medida el tiempo del ciclo.

Mecánicamente hablando, la destreza de la mano humana es referencia de las posibilidades potenciales que se pueden alcanzar en un sistema de manipulación [2].

Existen en el mercado robots específicamente diseñados para operaciones con sistemas de pick and place, que es un elemento imprescindible para la correcta manipulación de productos. Aun así, los manipuladores convencionales son rígidos en su mayoría, lo cual puede limitarlos. En comparación con los manipuladores blandos inspirados en la biología [3]. Que pueden realizar una variedad de tareas, como la manipulación hábil en espacios limitados o entornos

desconocidos. Debido a que los principios de diseño y las metodologías de operación para robots blandos son extremadamente diferentes de los manipuladores rígidos convencionales, en los últimos años se han desarrollado muchos mecanismos de diseño, estrategias de fabricación y control diferentes para estos robots [4]. Puesto que un diseño incorrecto puede dañar los productos con la consecuente merma en su calidad final.

Una mención aparte es la que requiere la organización Festo, ya que se ha dedicado a la investigación y desarrollo de efectores de pick and place, similares a la mano humana o tomando como referencia casos del mundo animal. Por mencionar algunos ejemplos tenemos, el MultiChoiceGripper y OctopusGripper.

El MultiChoiceGripper está inspirado en la forma de los dedos humanos y de cómo estos sujetan los objetos entre los dedos opuestos y el dedo pulgar. Este concepto es futurista, ya que combina diferentes formas de agarre. Los dedos pueden conmutar de forma que agarren de forma paralela o central, sin que se requiera una adaptación. Además no solo es variable en su dirección de agarre. También cuenta con algunos dedos adaptativos los cuales son flexibles a diferentes formas. De ese modo, sin un sistema de sensores adicional o técnica de regulación, puede también coger objetos de formas diferentes y muy delicados [5].

El OctopusGripper está basado en los tentáculos del pulpo ya que resulta ser extremadamente flexible y móvil, dando la característica de sujetar diferentes objetos a la perfección. La estructura de la pinza se compone de silicona blanda que puede controlarse de forma neumática. Si se presuriza con aire comprimido, el tentáculo se dobla hacia el interior y es capaz de coger el objeto que haya de sujetar con suavidad y adaptándose a la forma [6].

El trabajo se realizó con la intención de mejorar el diseño del Tri Max Gripper de Gareth [7], a través de un rediseño, con el interés de hacer uso de este en la industria agroalimentaria como primera opción, con el propósito de generar procesos productivos de mayor calidad y eficiencia, sin descartar su posible utilización en otros sectores.

Una vez hecho el rediseño con las mejoras consideradas, se realizó un estudio de movimientos mediante el programa SolidWorks y posteriormente se manufacturó el prototipo con

la técnica de modelado por deposición fundida, comúnmente conocida en la industria como manufactura aditiva (AM por sus siglas en inglés).

De acuerdo con la ASTM F2792, la AM, se define como el proceso de agregar o unir materiales capa por capa para crear objetos 3D a partir de un modelo 3D digital [8]. Los materiales a utilizar en AM son diversos, estos van desde materiales plásticos, metales, mezcla de plásticos con otros materiales, alimentos e incluso materiales orgánicos.

Para la simulación cooperativa fue necesario generar una interfaz SolidWorks-LabVIEW-Arduino, lo cual, requiere un mecanismo que permita desarrollar y ejecutar aplicaciones de forma distribuida y, al mismo tiempo, debe ser capaz de manejar la heterogeneidad de hardware presente en dichos sistemas, ocultar los detalles de la distribución y proveer un conjunto común de servicios específicos. Tal mecanismo es conocido como Middleware [9].

El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una simulación cooperativa para un gripper Agro-flexible elaborado con la técnica de modelado por deposición fundida mediante el enfoque basado en pruebas [10]. Para lograr lo anterior, el desarrollo se sustenta en usar un middleware para generar una interfaz SolidWorks-LabVIEW-Arduino, lo cual implica 6 Fases: A) Diseño; B) Análisis de movimiento; C) Procesamiento del modelo; D) Impresión del diseño; E) Post-Procesamiento; F) Desarrollo de interfaz, G) Resultados, mismas que serán explicadas en la sección siguiente.

## 2. Desarrollo.

### A. Fase de Diseño.

Consiste en la identificación de dimensiones del prototipo, las propuestas de mejoras, elaboración del diseño de cada parte, el ensamblaje de las piezas generadas, y la generación de planos en SolidWorks®. Fig. 1

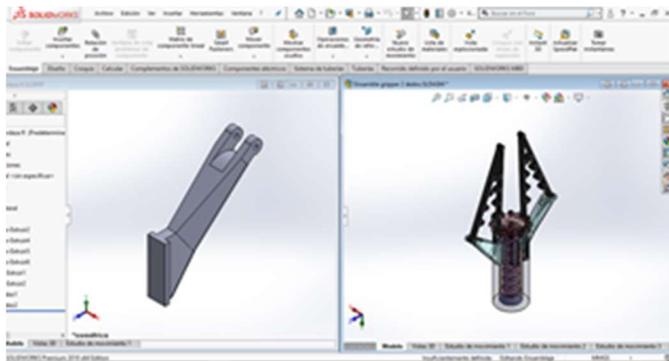


Fig 1. Soporte de pinza y Ensamble de prototipo con dos pinzas.

### B. Fase de Análisis de Movimiento.

Consiste en realizar el estudio de movimientos causado por el gripper utilizando en el ensamble 2, 3, 4 y 6 pinzas, así como la distancia máxima de apertura de estas, realizado en SolidWorks®, como se ejemplifica en la Fig. 2.

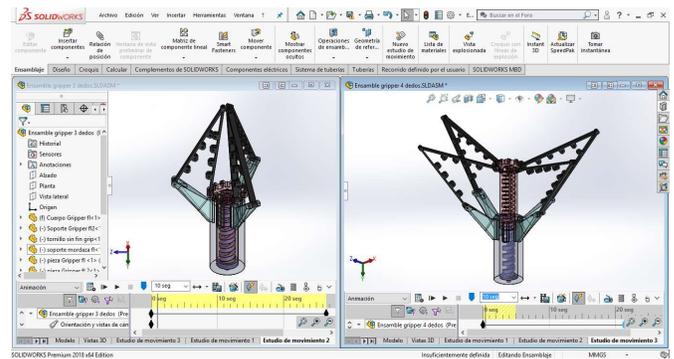


Fig 2. Estudio de movimiento en ensambles de prototipo con tres y cuatro pinzas.

### C. Procesamiento del modelo.

Consiste en modificar el formato de diseño, “.SLDPRT”, a formato “.STL” requerido para lectura de datos en el software Cura®. En el cual se establecen los parámetros del proceso de impresión 3D, la generación de Capas y del código G&M. Fig. 3

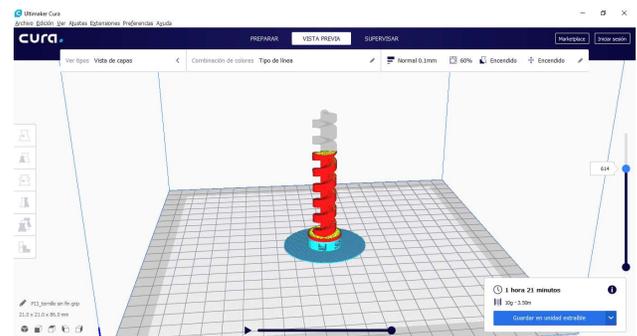


Fig 3. Vista de capas del tornillo sin fin del prototipo en Cura®

### D. Impresión del Diseño.

La impresión en 3D del diseño, se realiza con la técnica de modelado por deposición fundida, y consiste en definir los parámetros de setup de la impresora, verificar la nivelación de la cama de la máquina, asegurar la alimentación del extrusor así como su buen estado, al igual que constituir la comunicación con el archivo de código G&M “.gcode” generado por Cura®. Fig. 4



Fig 4. Parámetros de la impresora, nivelación de la cama e impresión de las piezas.

#### E. Fase de Post-Procesamiento.

Está vinculado con el acabado superficial necesario, directamente aplicado en los parámetros del software y de la máquina, al igual que la limpieza de las piezas, lo cual consiste en retirar los soportes colocados para la impresión. Fig. 5

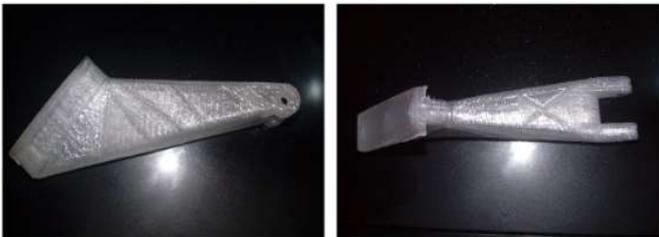


Fig 5. Soporte de pinza post-procesado.

#### F. Desarrollo de interfaz.

Consiste en realizar una interfaz para la co-simulación mediante el uso de un middleware para generar el vínculo entre los programas SolidWorks, LabVIEW y Arduino. Esto se generó con los siguientes pasos: a) Creación de proyecto en LabVIEW; b) Enlace SolidWorks-LabVIEW; c) Crear una Virtual Interface (VI); d) Enlazar LabVIEW-Arduino; E) Conexión física, mismos que serán explicados en la sección siguiente.

##### a. Creación de proyecto en LabVIEW.

Consiste básicamente en la instalación del programa LabVIEW, el cual funcionara como nuestro middleware para poder generar la interfaz, y la creación de un nuevo proyecto en blanco, lo cual apertura el Project Explorer para comenzar con la interfaz. Fig. 6

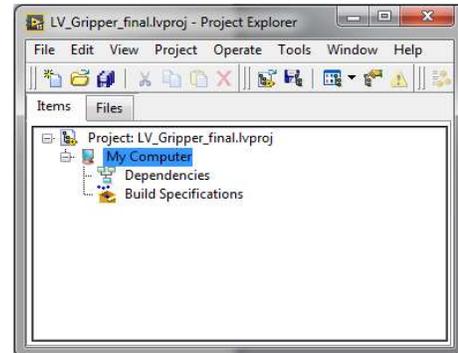


Fig 6. Ventana de Project Explorer.

##### b. Enlace SolidWorks- LabVIEW.

Consiste en vincular el programa LabVIEW con SolidWorks, para esto es necesario tener abierto previamente el estudio de movimiento realizado, lo cual nos permitirá importar los archivos del ensamble y generar el enlace. Fig. 7

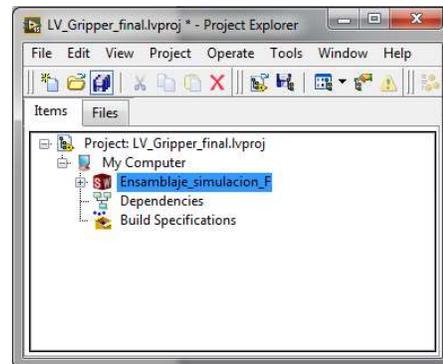


Fig 7. Ventana de Project Explorer enlazada con SolidWorks.

##### c. Crear una Virtual Interface (VI).

Previamente enlazado SolidWorks-LabVIEW, para poder crear la VI el proceso consiste en inicializar la ventana del panel frontal, en la que podremos configurar los controles de nuestra interfaz, y la ventana del diagrama de bloques, donde generaremos los bloques de señales que posteriormente se enlazarán con Arduino. Fig. 8

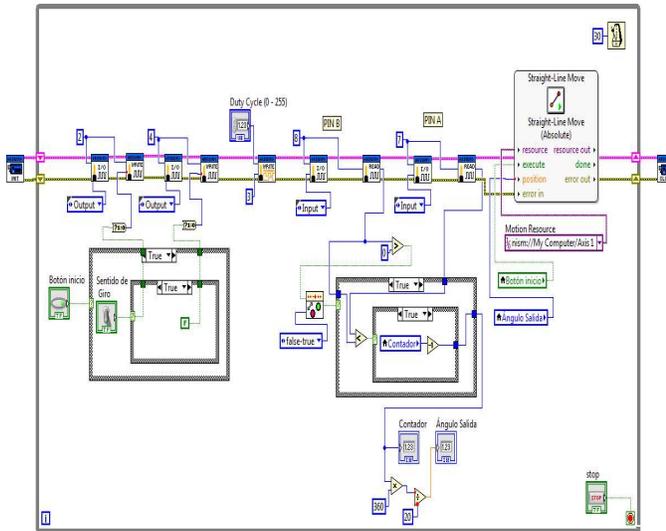


Fig 8. Diagrama final en LabVIEW para control de motor virtual en SolidWorks y físico a través de Arduino.

Simultáneamente generamos en el panel de control la interface virtual y posicionamos los elementos de la forma que requiramos. Fig. 9



Fig 9. Panel frontal. Controles de la interfaz virtual.

d. Enlace LabVIEW-Arduino.

Consiste en la instalación del software Arduino, y generar la vinculación con la placa Arduino UNO para posteriormente cargar el archivo generado por el software.

e. Conexión física.

Para la conexión física, se realizara un circuito con los siguientes elementos:

-Una compuerta L293D para el control de giro del motor, la cual incluye cuatro circuitos para

manejar cargas de potencia media, con la capacidad de controlar corriente hasta 600 mA en cada circuito y una tensión entre 4,5 V a 36 V. Fig. 10

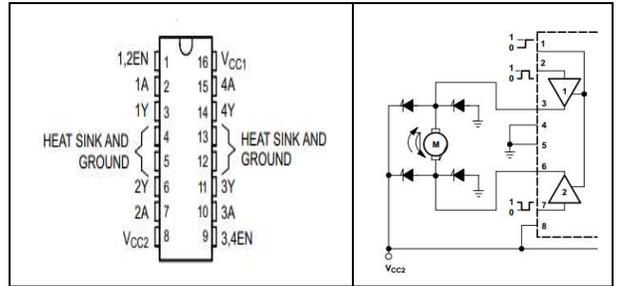


Fig 10. Terminales de compuerta L293D y diagrama de conexión del motor.

-Un encoder KY-040. Fig. 11

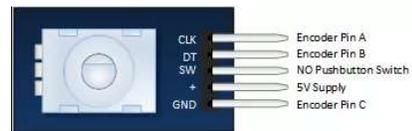


Fig 11. Terminales del encoder KY-040.

-Un motorreductor de CD a 6V-200RPM.

-La placa Arduino UNO, la cual controlara la parte física, es decir el motor que accionara el gripper.

G. Resultados.

Finalmente, el entorno de la simulación e interfaz quedan concluidas y lista para las pruebas virtuales y físicas, tal cual se aprecia en las Fig. 12, Fig13 y Fig.14.

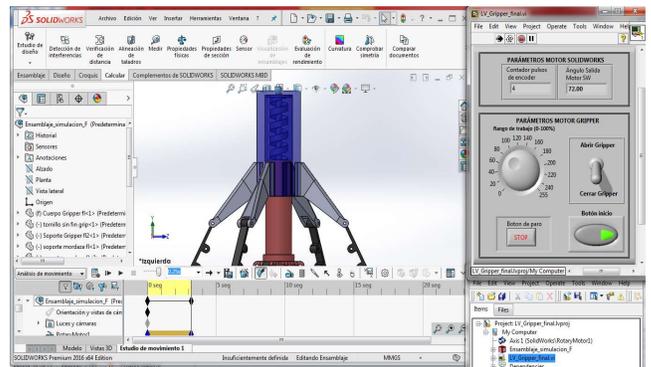


Fig 12. Entorno de simulación para el gripper sub-actuado

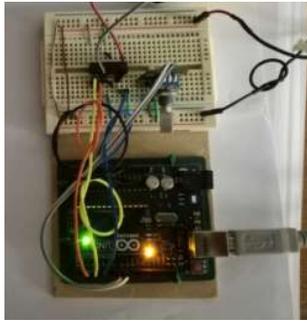


Fig 13. Conexión física

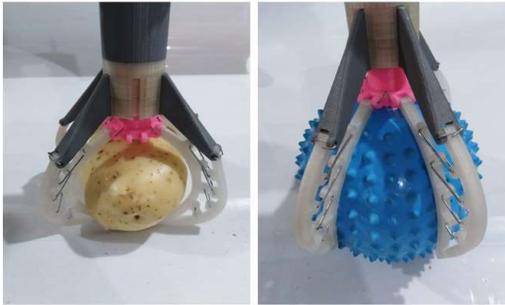


Fig 14. Prototipo manufacturado con impresión 3D para pruebas de sujeción y adaptabilidad a diferentes geometrías.

### 3. Conclusiones

Podemos concluir que el diseño del prototipo es bastante versátil, lo cual da la posibilidad de ser implementado en diferentes sectores y no solo en la industria agroalimentaria, sin embargo, aun contando con la flexibilidad de colocar diferente número de pinzas, para mejorar sujeción de objetos, y el uso de materiales soft flexibles en las pinzas, lo cual permite la adaptación a las diferentes geometrías, la manufactura de un prototipo de esta naturaleza, nos obliga a evaluar diferentes aspectos en el uso de nuevas tecnologías, como lo es la impresión 3D, y diferentes materiales, como lo son los rígidos y flexibles, lo que implica diferentes retos, incluidos los de la simulación cooperativa para las pruebas de funcionamiento, que en el caso de esta investigación fueron realizadas satisfactoriamente de manera virtual y física, con la interfaz SolidWorks-LabVIEW-Arduino.

Se recomienda probar diferentes configuraciones en el diseño de pinzas flexibles, así como generar diferentes parámetros para la impresión con materiales soft flexibles, modificando las proporciones del relleno y espesor de las paredes de la impresión.

### 4. Referencias

- [1] M. Wilson, 2010. Developments in robot applications for food manufacturing. *Industrial Robot*, 37(6), pp.498–502.
- [2] A. A. Kader & R.S. Rolle, 2004. The role of post-harvest management in assuring the quality and safety of horticultural produce, FAO.
- [3] B. Mazzolai , L. Margheri , M. Cianchetti , P. Dario , C. Laschi , Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions, *Bioinspir. Biomim.* 7 (2) (2012) 025005 .
- [4] D. Rus, M.T. Tolley , Design, fabrication and control of soft robots, *Nature* 521 (2015) 467 .
- [5] W. Stoll, H. Frontzek, A. Thallemer. (2016). MultiChoiceGripper. 2018, de FESTO AG & Co. KG Sitio web: [https://www.festo.com/PDF\\_Flip\\_Flip/corp/Festo\\_MultiChoiceGripper/en/files/assets/basic-html/page-6.html#](https://www.festo.com/PDF_Flip_Flip/corp/Festo_MultiChoiceGripper/en/files/assets/basic-html/page-6.html#)
- [6] W. Stoll, H. Frontzek, A. Thallemer. (2017). MultiChoiceGripper. 2018, de FESTO AG & Co. KG Sitio web: [https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/630182/Festo\\_TentacleGripper\\_en.pdf](https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/630182/Festo_TentacleGripper_en.pdf)
- [7] A. Fabio. (Diciembre, 2013). COMPLIANT ROBOT GRIPPER WON'T SCRAMBLE YOUR EGGS. Septiembre, 2018, de Robots Hacks Sitio web: <https://hackaday.com/2013/12/03/compliant-robot-gripper-wont-scramble-your-eggs/>
- [8] ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [9] L. Jingyong,Z. Yong, C. Yong, Z. Lichen. Middleware-based distributed systems software process. In: Proceedings of the 2009 International Conference on Hybrid Information Technology. pp. 345–348. ACM (2009).
- [10] H. León, I. Rodríguez & P. Arcos. (2018). Ingeniería de Reversa de un Gripper Robótico de Dos Pinzas con Manufactura Aditiva. En *Robótica y Mecatrónica* (507-514). Querétaro, Qro.: Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C.

### 5. Biografías

Miguel A. Pérez Terreros, Ing. Mecatrónico, con Especialidad en Sistemas de Manufactura, trabaja para la Universidad Politécnica del Valle de México, en la División de ingeniería industrial.

Horacio León Camacho, Doctor en Ciencias, especializado en Energía Renovable, Sistemas Híbridos, Diseño Mecatrónico, y Robótico, así como en Técnicas de Impresión 3D, fundador de la Start-Up, Genius-Tech, trabaja para la Universidad Politécnica del Valle de México, en la División de ingeniería industrial, en el Laboratorio de Tecnologías Inteligentes.

# Inclinómetro óptico utilizando fibra óptica monomodo para el monitoreo de desplazamiento vertical de estructuras civiles

J. Lara<sup>1,a</sup>, J. Camas<sup>1</sup>, R. Grajales<sup>1</sup>, R. Mota<sup>1</sup>, M. Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

<sup>a</sup> j.j.laragordillo@gmail.com

**Resumen**— En este artículo, se propone un sensor de inclinación de fibra óptica basado en la modulación de intensidad. El sensor de inclinación se compone de un engrane y una cremallera, cuando el eje del mecanismo sufre una inclinación, el engrane tiene una rotación y la cremallera tiene un desplazamiento lineal, a medida que se incrementa el ángulo de rotación, la fibra óptica se estira, ocasionando que cambie la tensión y el recorrido de la luz en la fibra óptica, logrando pérdida de potencia óptica. El sensor propuesto puede detectar un rango de inclinación de  $\pm 5^\circ$  y alcanzar una sensibilidad de  $0.37 \mu W/^\circ$ .

**Palabras clave.** Inclinómetro, fibra óptica, macrocurvatura.

## 1. Introducción

Los sensores de inclinación (también conocidos como inclinómetros) son de gran importancia para muchas aplicaciones en la ingeniería para medir con precisión la desviación angular de un objeto en un plano o en una línea.

Actualmente los sensores de fibra óptica están siendo utilizados en el área del Monitoreo de la Salud Estructural (SHM por sus siglas en inglés, Structural Health Monitoring) de obra civil, se emplean en muchas aplicaciones, se han utilizado para monitorear la estabilidad de las estructuras en áreas de deslizamientos de tierra [1][2], monitoreo estructural de edificios y carreteras [3], el monitoreo de inclinación de torres o pilares en puentes [4], en estructuras geotécnicas [5] y otras áreas de monitoreo de salud estructural [6].

Las estructuras civiles sufren factores que afectan su desempeño ante las acciones sísmicas, entre los que destacan: la edad de la construcción, ausencia de un programa de mantenimiento, la presencia de daños por eventos sísmicos ocurridos previamente, carga extrema, y otros. El daño a las estructuras civiles se acumula gradualmente, aunque en ocasiones no se observe un daño estructural relevante como grietas o deformaciones, la estructura civil sufre daños internos que quizá no pueda resistir sismos en un futuro o una falla desastrosa bajo cargas extremas.

Una sección importante para el monitoreo de una estructura civil es la inclinación de columnas. Los inclinómetros miden el ángulo de inclinación con respecto a un horizonte artificial, los sensores de inclinación convencionalmente se basan principalmente en los sensores de inclinación electroópticos, líquidos y los capacitivos. Los sensores de inclinación convencionales presentan desventajas como interferencia electromagnética, dependencia de la temperatura y humedad, problemas de fragilidad y procesos caros de ensamblaje [7].

Sin embargo, los sensores con tecnología de fibra óptica han demostrado un gran potencial cuando son comparados con los sensores de inclinación convencionales porque la tecnología de fibra óptica presenta mayores ventajas como inmunidad de interferencia electromagnética, los sensores de fibra óptica se pueden usar para monitoreo distribuido a gran escala, alta sensibilidad, peso liviano, buena adaptabilidad en forma, aislamiento eléctrico y una larga vida útil, son fáciles de instalar y pueden ser monitoreados en tiempo real [8].

En los últimos años, los clinómetros de fibra óptica se han desarrollado ampliamente debido a los méritos de la inmunidad a la interferencia electromagnética, un cableado fácil de los muchos sensores que estarán instalados en numerosos puntos críticos. Los inclinómetros de fibra óptica se han desarrollado en base a varios esquemas, que incluyen principalmente dos tipos los basados en rejillas y los basados en interferometría.

Moura et al. presentan un inclinómetro óptico basado en rejillas de Bragg desplazadas en fase en una topología cónica, se fabricaron dos rejillas de Bragg (FBG) de fase gradual cónica, ambas con una longitud de 45mm, que difieren solamente en la cintura del cono: una con  $30 \mu m$  y el otro con  $50 \mu m$ . Para la interrogación del sensor se utilizó un analizador de espectros óptico (OSA), para la rotación del sensor se empleó una plataforma rotativa, cuando el sensor es sometido a una inclinación, la región cónica se deforma, lo cual altera las propiedades de la rejillas desplazadas en fase, genera un acoplamiento de la luz que se propaga en el núcleo de la fibra con el revestimiento, si el cono está doblado, la luz en la región de revestimiento se pierde en el entorno externo y su intensidad disminuye [9].

Chung-Ru Chao et al. investigó un sensor de inclinación de fibra óptica basado en dos flotadores cilíndricos suspendidos en agua, conectados por rejillas de Bragg (FBG) cuando al sensor se le aplica una inclinación, la superficie del líquido que se encuentra en el contenedor formará un nuevo plano equilibrado y cambiará la altura del líquido en diferentes partes del contenedor. Entonces la fuerza de flotación de los cilindros provocará que uno de los FBG se estire y el otro se contraiga, por lo tanto, se genera un cambio de longitud de onda [8].

Amaral et al. investigó un interferómetro de Michelson constituido mediante el uso de la fibra cónica y las rejillas de Bragg (FBG) como sensor de flexión, el interferómetro se crea en la conicidad de la fibra y el espejo de baja reflectancia. El estrechamiento acopla una fracción de la luz del núcleo a los modos del revestimiento que se propagaran a lo largo de la

cavidad del interferómetro, luego se reflejan en el espejo, la interferencia se produce entre el haz del núcleo reflejado hacia atrás y los modos de propagación del revestimiento. El eje de rotación/flexión pasa por el centro geométrico del cono, originando un cambio de fase del interferómetro en un rango de  $0^\circ$  a  $7^\circ$ , con una sensibilidad óptica de fase a flexión  $\sim 1.13$  rad / grado y la resolución de ángulo de flexión de  $0.014^\circ / \sqrt{\text{Hz}}$  [10].

Nan-Kuang et al. propusieron un interferómetro de Mach-Zehnder, el cual consta de dos acopladores abruptos que sirven como acopladores de 3 dB conectados en corto lapso de fibra óptica. El primer acoplador sirve como un divisor de potencia para separar la luz en dos trayectorias ópticas diferentes, propagándose a través del cambiador de fase a lo largo del núcleo y el revestimiento respectivamente. El segundo estrechamiento abrupto recombina las señales de núcleo dividido y el modo de revestimiento para producir interferencias. El desplazador de fase sirve en la generación de una diferencia de fase entre las dos señales divididas, que es necesaria para lograr buena interferencia. El cambio de longitud de onda es de 40.8 nm cuando el ángulo se varió de  $0^\circ$  a  $32^\circ$ . Donde el eje de rotación atraviesa el centro del cono, por lo tanto, cuando se inclina a un ángulo, el estrechamiento también cambia, afectando el acoplamiento del modo del núcleo a los modos del revestimiento [11].

Sin embargo, si el ángulo de inclinación se puede obtener a partir del cambio en la intensidad de la luz de salida de la fibra óptica medida con un instrumento estándar, el sistema se vuelve más útil y económicamente viable. Para resolver estos problemas, el objetivo de este artículo se puede justificar con el desarrollo de un inclinómetro de fibra óptica basado en la intensidad de la luz de salida. En el esquema propuesto las pérdidas de intensidad son causadas por macrocurvaturas, ante la inclinación de un mecanismo de fotodetección, el cual tiene un rango de inclinación de  $\pm 5^\circ$ ; el cual deriva la relación entre el ángulo de inclinación y la intensidad de la luz transmitida. Los resultados experimentales muestran que la sensibilidad del ángulo de inclinación es  $0.37 \mu\text{W}/^\circ$ , en un desplazamiento angular de  $0^\circ$  a  $10^\circ$ . Más detalles del principio, análisis y resultados experimentales se demuestran en el documento.

## 2. Principio y fabricación del sensor

### 2.1 Principio de funcionamiento

La trayectoria de un cable de fibra óptica puede no seguir una trayectoria rigurosamente recta, y por lo tanto surgirán curvaturas. En específico, las condiciones de reflexión total interna suponen un núcleo y cubierta totalmente recta. Sin embargo, cuando la fibra tiene una curvatura, el ángulo de cada reflexión ya no es el mismo entre una reflexión y otra (véase la Fig. 1).

En la Fig. 1, el rayo llega en A, B, C con ángulos  $\alpha$  diferentes. En el ángulo  $\alpha_3$  es muy pequeño para que ocurra una reflexión total interna, y la luz queda confinada en el revestimiento. Por lo tanto, hay una pérdida de luz y potencia

óptica. Si el radio de la curvatura  $R$  no es muy pequeño (poca curvatura), el valor de  $R$  que produce una atenuación de -3 dB del flujo energético transmitido este dado aproximadamente por la ecuación 1:

$$R \approx 10 \frac{a}{(A.N)^2} \quad (1)$$

Donde  $a$  es el radio del núcleo y A.N es la apertura numérica de la fibra óptica [12].

### 2.2 Desarrollo y configuración experimental del sensor

El esquema del sensor de inclinación propuesto se expone en la Fig. 2, consta de un mecanismo compuesto por un piñón (engrane de dientes rectos), que engrana con una barra dentada (cremallera) de forma que, cuando el piñón gira, la barra dentada se desplaza longitudinalmente. Para que el engranaje sea posible y el piñón pueda deslizarse sobre la cremallera es necesario que tanto el piñón como la cremallera posean el mismo módulo.

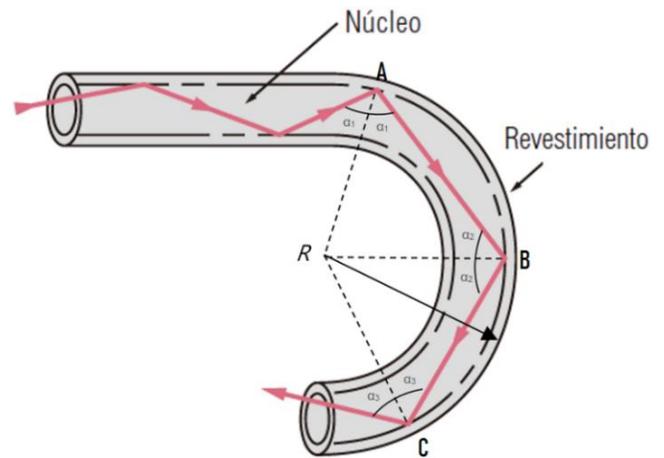


Fig 1. Fibra curvada con radio de curvatura R.

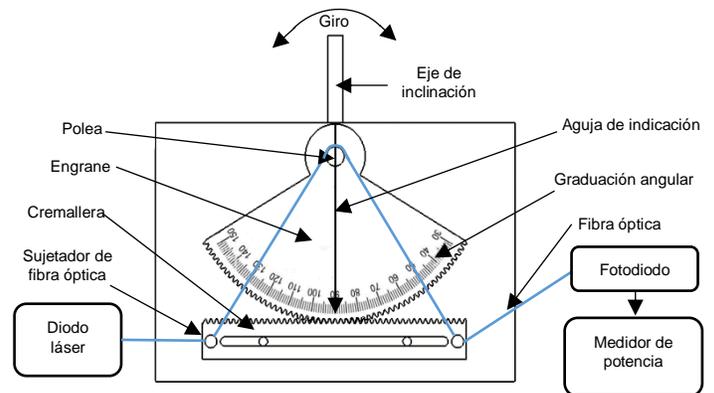


Fig 2. Esquema del sensor de inclinación propuesto.

Se fabricó un engrane y una cremallera de dientes rectos con un módulo de 1.5 para ambas piezas. En la transmisión por engranajes es necesario tener una holgura entre los dientes que se engranan, para prevenir que los dientes se traben entre sí cuando aumente la temperatura, en el caso del mecanismo de inclinación propuesto esto deja de ser significativo porque nunca está en movimiento constante. El engrane tiene un diámetro exterior de 25 cm, 0.5cm de espesor, en el eje del engrane se diseñó una polea de 0.8 cm de espesor y un diámetro de 1.5 cm. La cremallera tiene una longitud de 22 cm, se observa que se ha añadido a la cremallera dos sujetadores de fibra óptica, los cuales son primordiales para mantener a la fibra óptica sin movimiento. Para inclinar el mecanismo se cuenta con un eje de inclinación como se observa en la Fig. 2, el cual rota al engrane por medio de un rodamiento incrustado en el engrane del mecanismo. Para conocer el desplazamiento angular el mecanismo cuenta con una aguja de indicación que se mantiene inmóvil durante la inclinación y además cuenta con una graduación angular sobre una cara del engrane, esta indica cuantos grados se ha desplazado con respecto a la vertical. El mecanismo puede moverse en dos direcciones izquierda y derecha.

Se puede observar en la Fig. 2 que la trayectoria de la fibra óptica consta de 6 puntos, el primer punto es la conexión de el conector tipo FC al diodo láser, el segundo punto es el primer sujetador de fibra óptica el cual presiona a la fibra óptica y la mantiene inmóvil, el tercer punto en la trayectoria de la fibra óptica es la polea, el cuarto punto es el segundo sujetador de fibra óptica y el quinto punto es la conexión del conector ST al fotodiodo (S150C), finalmente el sexto punto es la conexión del fotodiodo con el medidor de potencia. Para caracterizar el inclinómetro; se recurrió a la siguiente configuración experimental que se observa en la Fig. 2, se utilizó un diodo láser con un rango de onda de 600 - 650 nm, para la detección de la intensidad óptica de la señal de salida se emplea un fotodiodo (S150C) de Thorlabs el cual tiene un rango de onda de 350 - 1100 nm y un medidor de potencia (PM320E) de Thorlabs el cual tiene un rango de detección de 185 nm - 25 μm. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo con una fibra óptica monomodo de 9 μm.

Cuando el eje del mecanismo sufre una inclinación, el engrane presenta una rotación y la cremallera tiene un desplazamiento lineal, a medida que se incrementa el ángulo de rotación, la fibra óptica se estira sin perder ninguna de sus propiedades físicas, ocasionando que la luz en la fibra óptica tenga una nueva trayectoria y cambie su tensión; logrando una pérdida de intensidad óptica, por el contrario, a menor ángulo de inclinación, la fibra óptica tendrá menor tensión, provocará una intensidad óptica mayor.

Para pruebas experimentales el sensor se inclinó de 0° a 10°, en una resolución de inclinación de 0.5°, el medidor de potencia fue calibrado a una longitud de onda específica, para capturar la máxima intensidad en la fibra óptica, se selecciona a una longitud de onda de 650 nm, debido a la gráfica del

espectro del láser (Fig. 4) se observa que a 650 nm, es donde se captura mayor intensidad de luz de la fuente, lo cual originará mayor sensibilidad al momento de inclinar el sensor. En la Tabla 1 se registraron las mediciones realizadas para el inclinómetro y la relación de valores de intensidad a la salida de la fibra óptica por grado desplazado.

TABLA I. RESULTADOS DE INCLINACIÓN DEL SENSOR

Grados de inclinación (°)	Potencia óptica (μW)
0.0	30.10
0.5	29.73
1.0	29.21
1.5	29.07
2.0	28.95
2.5	28.80
3.0	28.63
3.5	28.38
4.0	28.27
4.5	28.02
5.0	27.75
5.5	27.50
6.0	27.26
6.5	27.05
7.0	26.82
7.5	26.74
8.0	26.66
8.5	26.53
9.0	26.43
9.5	26.37
10.0	26.29

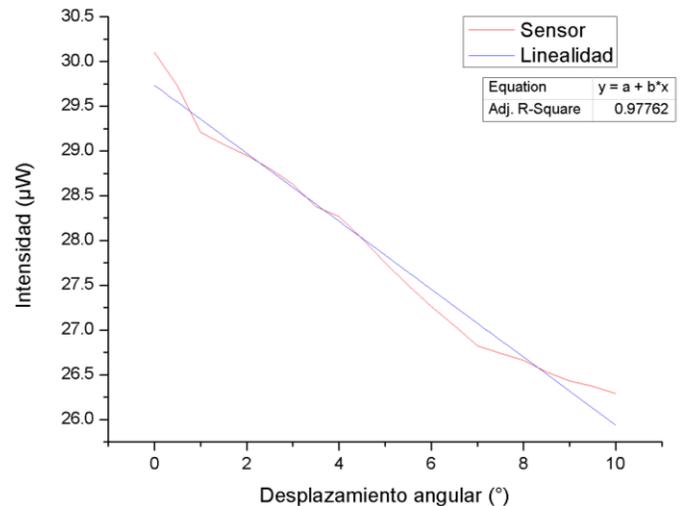


Fig 3. Cambio de intensidad cuando el ángulo de inclinación se incrementa de 0° a 10°.

Con los valores de la TABLA I, se construyó una gráfica de desplazamiento angular contra la intensidad (Fig. 3). La gráfica se construyó colocando en el eje de la variable independiente (eje x) el rango de mediciones de desplazamiento angular (°) y en el eje de la variable dependiente (eje y) el valor correspondiente a la intensidad (μW). Esto con el fin de obtener

la ecuación que representará el valor correspondiente a cierto ángulo de inclinación dado por el inclinómetro. La recta de tendencia lineal obtenida se denota en la gráfica como Linealidad. Con la ayuda de la gráfica generada (Fig. 3) se comprobó la linealidad de salida del inclinómetro, por lo que se generó la ecuación de la recta a partir de los datos graficados.

La ecuación de la recta para el inclinómetro es:

$$y = 29.73 - 0.37x \tag{2}$$

La ecuación 2 describe el comportamiento del sensor de inclinación que se observa en la gráfica de la Fig. 3. Es una función lineal de la forma  $y = mx + b$  donde, el termino independiente representa la intensidad inicial de la fibra óptica; esto es  $0^\circ$ , el signo negativo indica que la función es decreciente; es decir, que al aumentar los grados desplazados se tendrá mayor pérdida en la intensidad óptica, los resultados obtenidos mostraron un valor de sensibilidad (valor de la pendiente de la recta) por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular de  $0.37 \mu W/^\circ$  y el coeficiente de determinación del sensor  $R^2$  es 0.977.

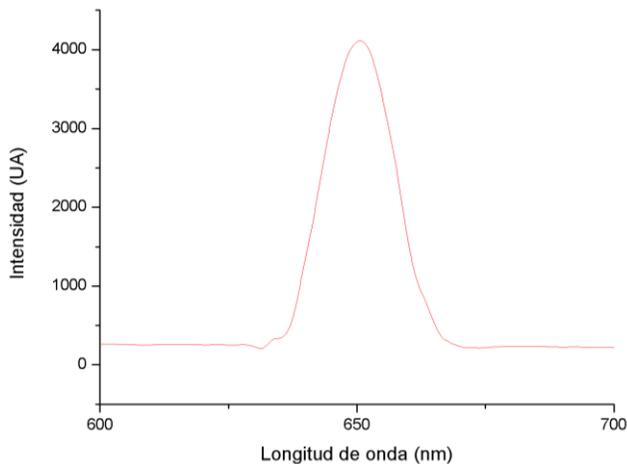


Fig 4. Intensidad relativa y espectrómetro del diodo láser

La Fig. 5 muestra una prueba experimental para ejemplificar el comportamiento del espectro óptico que sufre la luz del diodo láser en la fibra óptica ante la inclinación del mecanismo. Para la detección del espectro óptico se recurrió al espectrómetro HR4000CG-UV-NIR de Ocean Optics, donde el sensor de inclinación se varió de  $0^\circ$  a  $10^\circ$  en una resolución de  $2^\circ$ , la imagen muestra la atenuación de potencia óptica al variar el ángulo de inclinación del mecanismo. Cabe mencionar que el equipo óptico utilizado como el espectrómetro (HR4000CG-UV-NIR) y el medidor de potencia óptica (PM320E) son costosos por esta razón en la aplicación real estos pueden ser remplazados por fotodiodos comerciales que son de bajo costo.

Sin embargo, el mecanismo de inclinación comienza a originar un cambio obvio de tensión significativa a partir del quinto grado, es decir, que a partir de este empezará a detectar una disminución de intensidad coherente, el mecanismo aún

tiene un prometedor rango de inclinación, permite inclinarse de  $0^\circ$  a  $10^\circ$  en una sola dirección; o de  $\pm 5^\circ$  de izquierda a derecha, dependerá de la aplicación deseada.

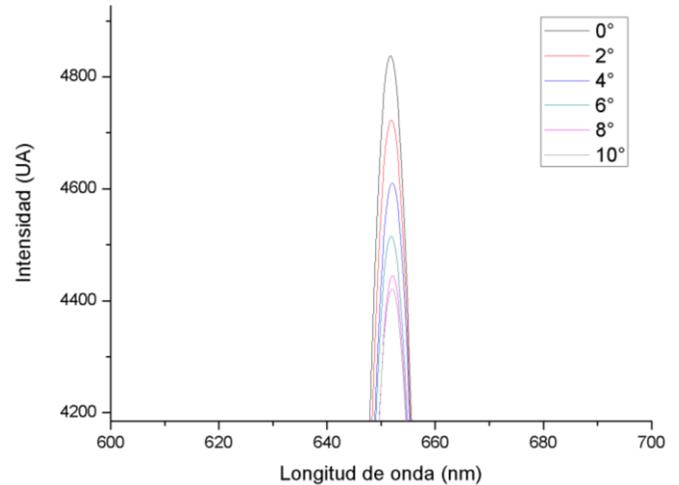


Fig 5. Espectro del láser ante la inclinación del sensor.

### 3. Conclusiones

Se desarrolló y caracterizó un sensor de inclinación el cual provoca pérdida de intensidad óptica en una fibra monomodo estándar a través de un mecanismo de inclinación, basado principalmente por un engrane-cremallera; y un mecanismo de fotodetección basado en un láser y un medidor de intensidad óptica. Como resultado de la configuración experimental, cuanto más inclinación experimente el mecanismo, generará mayor pérdida de intensidad óptica. De todo esto, se conoce la ecuación característica de su comportamiento y la sensibilidad del inclinómetro, por el cambio de intensidad en relación al desplazamiento angular, que es de  $0.37 \mu W/^\circ$  y posee una resolución de  $\pm 0.25^\circ$ .

Los instrumentos de medición convencionales tienen buena resolución y sensibilidad, no obstante, requieren de la intervención humana para tomar la medición y limitan el monitoreo en tiempo real. Por lo tanto, dicho dispositivo puede operarse como un sensor de inclinación de buena sensibilidad con ventajas de fácil fabricación, bajo costo y monitoreo en tiempo real. En comparación con los sensores informados anteriormente; la interrogación del sensor se puede realizar con técnicas más baratas y más prácticas que un analizador de espectros ópticos (OSA). El sensor de inclinación propuesto tiene un margen de medición de  $0^\circ$  a  $10^\circ$  por lo tanto, es útil para la aplicación de detección de inclinación de edificios (de acuerdo a las normas de construcción), para salvaguardar la integridad humana. Es posible un progreso futuro en la mejora del sensor de inclinación, como mejorar la estructura mecánica para mejorar su sensibilidad, resolución y medir la inclinación tanto en “x” como en “y”.

#### 4. Reconocimiento

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por haber patrocinado parcialmente el proyecto con número 6088.19-P y al CONACYT por proporcionar beca de Maestría.

#### 5. Referencias

- [1] Ferdinand, P. "Optical fiber Bragg grating inclinometry for smart civil engineering and public works," Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors. Vol. 4185. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [2] Pei, Hua-Fu, et al. "Monitoring of lateral displacements of a slope using a series of special fibre Bragg grating-based in-place inclinometers," Measurement Science and Technology 23.2 (2012): 025007.
- [3] Leung, Christopher KY, et al. "Optical fiber sensors for civil engineering applications," Materials and Structures 48.4 (2015): 871-906.
- [4] Casas, Joan R., and Paulo JS Cruz. "Fiber optic sensors for bridge monitoring," Journal of bridge engineering 8.6 (2003): 362-373.
- [5] Pei, Hua-Fu, Jian-Hua Yin, and Wei Jin. "Development of novel optical fiber sensors for measuring tilts and displacements of geotechnical structures," Measurement Science and Technology 24.9 (2013): 095202.
- [6] Ma, Guo-ming, et al. "A fiber Bragg grating tension and tilt sensor applied to icing monitoring on overhead transmission lines," IEEE Transactions on Power Delivery 26.4 (2011): 2163-2170.
- [7] Yao, Baoyin, et al. "Micro-grating tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation," Optik-International Journal for Light and Electron Optics 126.1 (2015): 144-147.
- [8] Chao, Chung-Ru, Wei-Lun Liang, and Tsair-Chun Liang. "Design and Testing of a 2D Optical Fiber Sensor for Building Tilt Monitoring Based on Fiber Bragg Gratings," Applied System Innovation 1.1 (2018): 2.
- [9] Moura, João P., et al. "Optical inclinometer based on a phase-shifted Bragg grating in a taper configuration," IEEE Photonics Technology Letters 26.4 (2013): 405-407.
- [10] Amaral, L. M. N., et al. "Fiber-optic inclinometer based on taper Michelson interferometer," IEEE Sensors Journal 11.9 (2011): 1811-1814.
- [11] Chen, Nan-Kuang, et al. "Interferometric interrogation of the inclination and displacement of tapered fiber Mach-Zehnder interferometers," IEEE Sensors Journal 13.9 (2013): 3437-3441.
- [12] Nerou, Jean Pierre, and Orsina Ma Gascón Busto. "Introducción a las telecomunicaciones por fibras ópticas," Trillas, 1991.

#### 5. Biografías

Juan de Jesús Lara Gordillo es graduado como Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG). Su área de interés es sensores ópticos, sensores de fibra óptica, optoelectrónica y optomecatrónica.

Jorge Luis Camas Anzueto es graduado como Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Sistema Nacional de Investigadores nivel I, Sistema Estatal de Investigadores miembro honorífico graduado como Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias con la Especialidad en Óptica y subespecialidad Optoelectrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Actualmente docente-investigador de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, Doctorado en Ciencias de la Ingeniería y de la carrera en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Su área de interés es sensores ópticos, sensores de fibra óptica, optoelectrónica y optomecatrónica.

Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó una estancia Posdoctoral (2 años) en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es

miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, ha publicado 12 artículos de riguroso arbitraje a nivel internacional, más de 20 congresos internacionales. Sus investigaciones están dirigidas en el estudio teórico, numérico y experimental de nuevas arquitecturas de switches ópticos de fibra, en particular interferómetros de Sagnac para el procesamiento digital todo-óptico, la caracterización de trenes de pulsos ópticos ultracortos y el amarre de modos pasivo y desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables y a múltiples longitudes de onda. Actualmente imparte clases en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Rafael Mota Grajales es graduado como Ingeniero Industrial Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el Instituto Tecnológico de la Laguna y Candidato a Doctor en Control Industrial por la Universidad Claude Bernard, Lyon 1, Lyon, Francia. Su área de interés es aplicaciones industriales, automatización e instrumentación de procesos y control automático.

Madaín Pérez Patricio es graduado como Doctor en Ciencias en Automatización y computación industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador- Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Sistema Nacional de investigadores nivel I, sistema estatal de investigadores. Su área de interés incluye visión por computadora y computación reconfigurables.

# Medición de corriente eléctrica usando Redes Neuronales

E. González <sup>1,a</sup>, J. Camas<sup>b</sup>, E. Escobar, J. Velázquez, R. Grajales

<sup>1</sup> Instituto Nacional de México

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, M.C en Ingeniería Mecatrónica

<sup>a</sup> elide\_glez.leon@hotmail.com,

**Resumen**— En el presente trabajo se comprueba que, con la medición de temperatura con un sensor electrónico de precisión, se puede predecir la corriente eléctrica que circula en un cable de cobre de calibre delgado causado por el efecto Joule que ocurre cuándo el cable libera energía en forma de calor. Esto se realizó mediante la medición de la temperatura en el exterior del cable. Los datos obtenidos de la medición se introdujeron a dos ANN (Artificial Neuronal Network) dinámicas feed forward, cuya variable de entrada es la temperatura y de salida es la corriente eléctrica. Pruebas preliminares nos indican que con este tipo de técnica se obtiene un error de  $10^{-4}$  y un tiempo de respuesta de 1 segundo, al medir corriente eléctrica entre el intervalo de 0 a 10 Amperes.

*Corriente eléctrica, Red Neuronal, Medición indirecta.*

## 1. Introducción

La ciencia que predice el intercambio de energía entre cuerpos materiales como la diferencia de temperatura es la transferencia de calor [1]. Un claro ejemplo de transferencia de calor es el efecto Joule, fenómeno físico que ocurre cuándo un cable conductor que está siendo alimentado por corriente eléctrica, libera energía en forma de calor.

El calor ganado por el efecto Joule demuestra la dependencia [2] que existe entre el crecimiento de la temperatura del cable con la corriente eléctrica.

Las medidas indirectas son resultado de emplear expresiones matemáticas usando cantidades físicas que fueron medidas indirectamente. Entre los casos más comunes para mediciones indirectas de variables eléctricas están el de la potencia y resistencia eléctrica [3]. Sin embargo, en este proyecto se propone una nueva medición indirecta que conlleva a medir la temperatura en un cable conductor y con un algoritmo de inteligencia artificial como lo son las Redes Neuronales, predecir en tiempo real la corriente eléctrica que circula por el mismo.

Por otra parte, la IA (Inteligencia Artificial) se deriva de las ciencias computacionales, utiliza métodos no algorítmicos para la resolución de problemas. Las tres grandes ramas que componen la IA son: Lógica difusa [4], Redes Neuronales [5] y Algoritmos genéticos. A cada rama la componen diferentes metodologías, como se estipula en la búsqueda extensa de información sobre algoritmos de IA. El enfoque que se muestra está abocado hacia las Redes Neuronales denominadas también como sistemas neuronales artificiales o ANS (Artificial Neuronal Systems) [6].

Las ANNs se usan para modelar la forma de procesamiento de información [7] simulando un cerebro humano. La arquitectura de una ANN incluye el número de capas ocultas, número de

neuronas ocultas, las funciones de transferencia específicas, el flujo de datos (directos o recurrentes) y la forma en que las neuronas están conectadas [8]. Existen varios tipos de ANN.

Las redes neuronales estáticas solo procesan patrones de entrada como lo son: de naturaleza espacial, es decir, patrones de entrada que pueden organizarse a lo largo de uno o más ejes espaciales, como un vector o una matriz. En muchas tareas el patrón de entrada comprende una o más señales temporales, como el reconocimiento de voz, el tiempo, predicción de series y filtrado de señales [9].

En este artículo se propone una nueva medición indirecta que conlleva a medir la temperatura en un cable conductor y con un algoritmo de inteligencia artificial como lo son las Redes Neuronales, predecir la corriente eléctrica que circula por el mismo. En este caso se usaron 2 de tipo feed forward dinámicas: Time Delay Neuronal Network y Layer-Recurrent Network.

De los casos más comunes de mediciones indirectas para variables eléctricas se encuentran los siguientes: sensores de fibra óptica, multímetros, amperímetros entre otros.

Como por ejemplo el multímetro fluke 8508 A, el cuál mide la capacitancia utilizando un método indirecto, derivando la cantidad de voltaje, corriente eléctrica y tiempo de carga del capacitor. La medición de capacitancia mediante un método indirecto se lleva a cabo midiendo el cambio de voltaje del capacitor debido al efecto de carga, cuándo se aplica una corriente constante durante un periodo definido [10].

También existen los sensores de fibra óptica que funcionan con el principio de campo magnético, los sensores de corriente que contienen material ferromagnético también sufren histéresis, el circuito magnético de alta capacidad concentra las líneas de campo de la corriente medida, de modo que el flujo medido en el circuito magnético no depende de la posición real del conductor.

La medición de corriente utilizando una resistencia de derivación es poco práctica o imposible en algunos casos. Los sensores de corriente sin contacto mantienen aislamiento galvánico entre la corriente medida y su voltaje de salida. LEF, FW Bell, VAC, Honeywell, Telcon y muchos otros fabricantes producen una amplia gama de sensores de corriente sin contacto de CA y CC [11].

De los avances más recientes en cuanto a medición de corriente, se encuentra el sensor de fibra óptica que mide simultáneamente corriente y voltaje, donde se usa una sola fibra para transportar la información sobre ambas variables del detector. En este sistema se considera el uso factible del efecto de campo magnético para la medición de corriente y el efecto piezoeléctrico para el voltaje [12].

## 2. Parte técnica del artículo.

### A. Arreglo experimental

El arreglo experimental consta de una fuente de C.A Agilent 6813b, cable de cobre calibre 14, un sensor de RTD (Detector de Resistencia por Temperatura) modelo TH100PT, un arduino y una resistencia eléctrica que sirve para recibir la carga proveniente de la fuente de C.A.

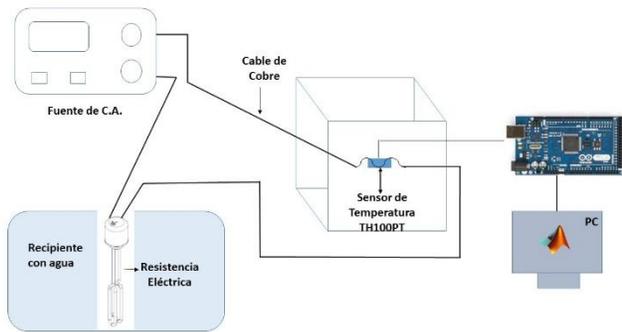


Fig.1 Diagrama correspondiente a la propuesta experimental

Se derivan de la fuente 2 cables de cobre en donde va conectada una resistencia eléctrica que se encuentra en un recipiente con agua, ésta es capaz de soportar la corriente alterna desde 0 hasta 10 Amperes. Un tramo de uno de los cables está sin recubrimiento, es decir se encuentra a la intemperie el cobre puro y se mantiene dentro de una caja, el material de la caja es de vidrio que es eficiente para aislar la temperatura, ya que lo que se necesita es que la temperatura exterior no le afecte al experimento y así se puede obtener mejores lecturas de la temperatura en el cable. El sensor de temperatura va conectado al microcontrolador arduino, se crea una interfaz se entre el arduino y el el Matlab para el procesamiento de datos y el entrenamiento de las ANNs.

### B. Caracterización del sensor

Se alimentó el cable a diferentes niveles de Corriente eléctrica y se realizaron las mediciones de temperatura con el sensor PT100, las lecturas se tomaron con el microcontrolador arduino. La siguiente grafica muestra las lecturas que se tomaron en varios intervalos de corriente eléctrica.

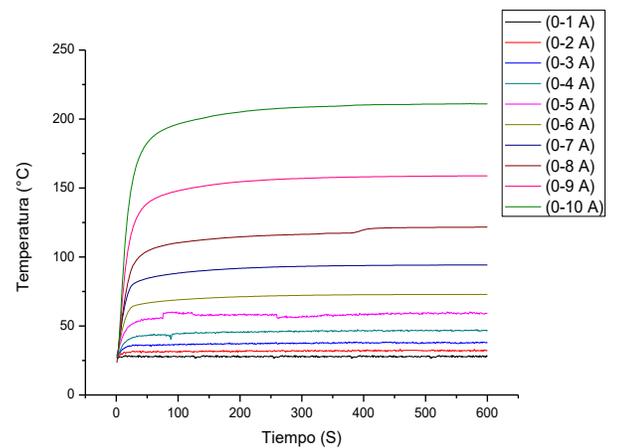


Fig. 2 Gráfica de las lecturas de datos obtenidos.

### C. Obtención de datos

Se realizaron mediciones simultáneas de corriente eléctrica y temperatura en el cable de cobre. En la gráfica siguiente se puede observar que, a medida del crecimiento de la corriente eléctrica, aumenta la temperatura del cable.

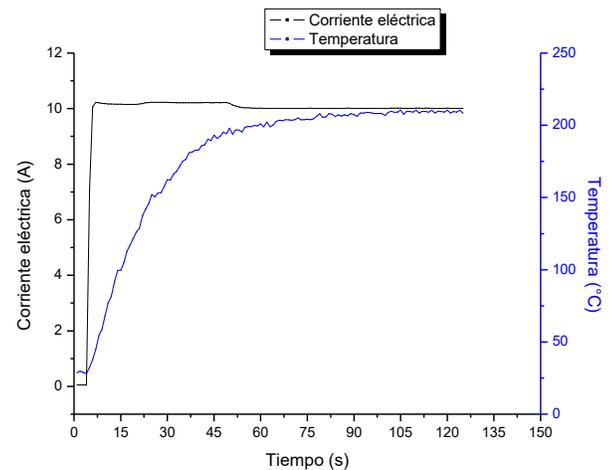


Fig. 3 Gráfica de la lectura de datos obtenidos.

El cable que se usa en el experimento es de cobre de calibre 14, como ya se mencionó anteriormente, esto debido a que es uno de los calibres más delgados, por lo que el desprendimiento de energía liberada es más rápido. La temperatura máxima de cada medición alcanza los dos minutos. Los datos con los que se entrenan las ANNs fueron tomados a cada segundo, es decir cada ANN se entrena con 125 muestras, esto se debe al funcionamiento de cada ANN como se muestra a continuación.

### D. ANNs Propuestas

La ANN time delay consta da una línea con varios retardos de tiempo que se organizan en un orden incremental, como se observa en la siguiente figura, donde D representa cada retardo que ingresa como señal de entrada a la primera capa oculta de la ANN, después de pasar un intervalo de tiempo, el operador genera la señal como una salida.

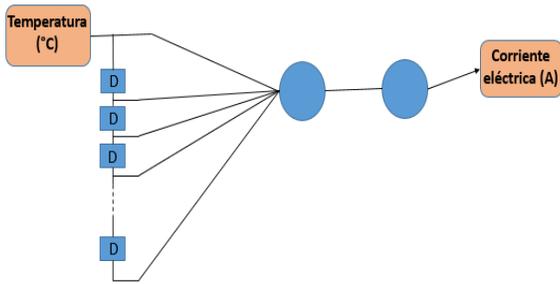


Fig. 4 Arquitectura de la ANN Time-Delay

Una red de capa recurrente contiene un bucle de retroalimentación, con un solo retardo, alrededor de cada capa de la red, excepto la última capa, como se puede observar en la figura 2.

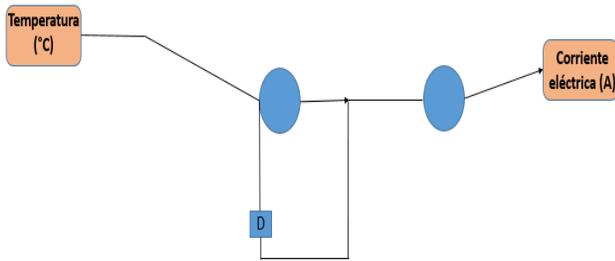


Fig. 5 Arquitectura de la ANN Layer-Recurrent

### E. Entrenamiento de las ANNs.

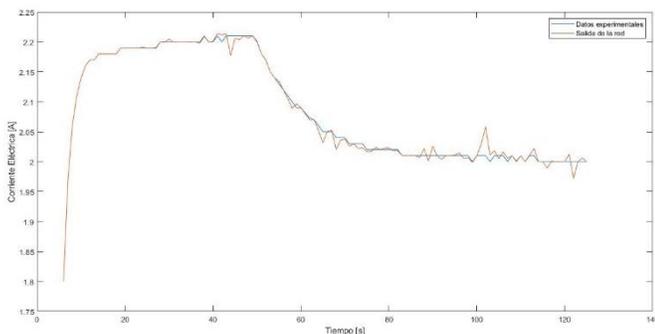


Fig. 6 Gráfica correspondiente a la salida de la Red Time Delay comparada con los datos reales.

En esta gráfica se observa la predicción que realiza la red Time Delay, la línea azul representa la salida de los datos con los que se entrenó y la línea naranja es la salida de la red, se observa también que en algunas partes la línea de los datos experimentales se aleja, esto se debe a los datos con los que se entrenó la ANN y a la estructura de la misma. En la figura 6 se aprecia que la medición va desde los 0 hasta 2.2 Amperes.

Para saber la precisión con la que se entrenó la Red, es necesario calcular el error cuadrático medio, se presenta a continuación la gráfica.

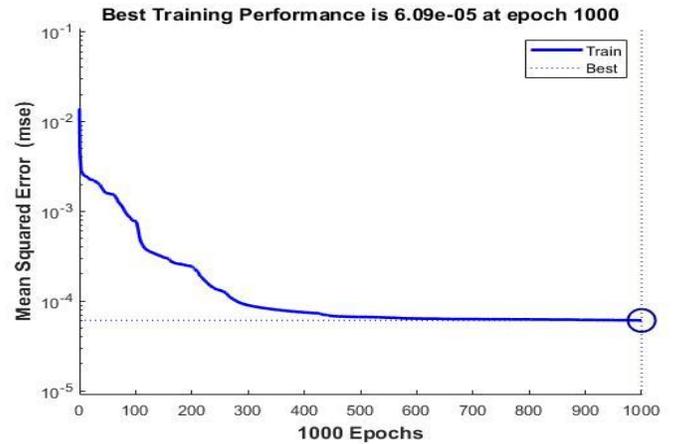


Fig. 7 Error cuadrático medio de la ANN.

Se logra percibir que entre 100 y 200 épocas que equivalen a las iteraciones que realiza la Red, el error tiende a 0, por lo que podría decirse que el ajuste que realiza la red es el deseado.

A continuación, se puede observar la salida de la ANN Layer Recurrent.

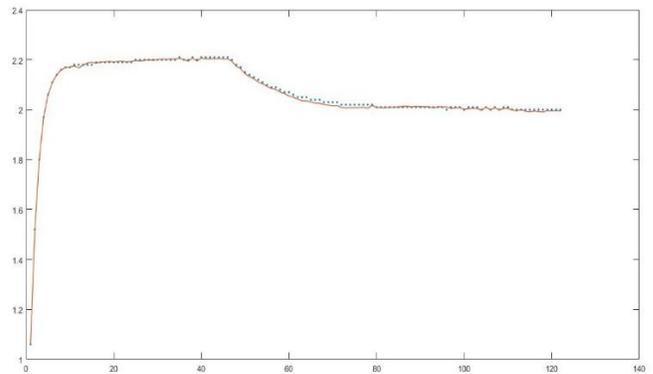


Fig. 8. Gráfica correspondiente a la salida de la Red Layer Recurrent comparada con los datos reales.

Se alcanza a percibir la predicción que realiza la Red, que va de 0 a 2.2 Amperes, la línea de puntos azules representa la salida de los datos con los que se entrenó y la línea naranja la salida de la red.

De igual manera como se realizó con la red anterior se calcula el error cuadrático medio para saber qué tan preciso fue el entrenamiento.

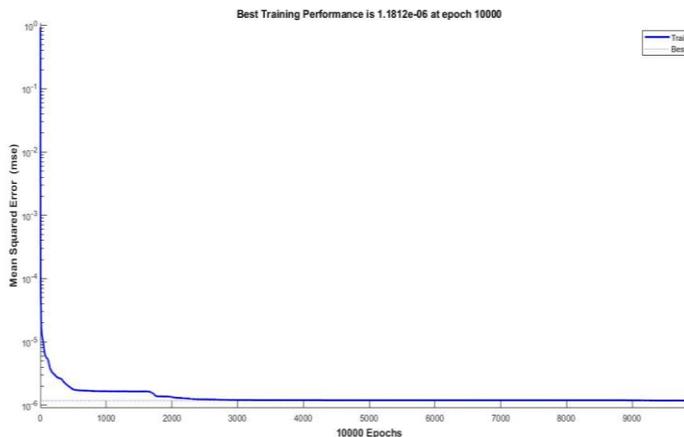


Fig. 9 Error cuadrático medio de la ANN.

En este caso se percibe que entre 500 y 1000 épocas, el error tiende totalmente a 0.

Con el análisis de las gráficas obtenidas, es posible afirmar que el uso de cualquiera de las Redes que fueron utilizadas, es viable para la predicción de la corriente eléctrica, y que si se lleva a pruebas físicas es probable que la medición sea precisa y confiable.

### 3. Conclusiones

Se pretende continuar con el proyecto y realizar pruebas experimentales, esto con el fin de llevar a cabo mediciones físicas. Hasta el momento la caracterización se ha realizado para un cable de cobre calibre 14, por lo que cabe mencionar que únicamente para este tipo de cable funcionaría la predicción de la corriente eléctrica. Sin embargo, no cabe duda de que se podría realizar la caracterización para cualquier cable de otro material conductor. El intervalo de medición de corriente eléctrica es desde los 0 hasta los 10 Amperes, ya que la capacidad de la fuente de C.A. con la que se cuenta, es limitada a ese rango.

A diferencia de cualquier multímetro digital convencional esta técnica de medición puede servir en un futuro para medir rangos mucho más altos de corriente eléctrica, en sistemas de alta potencia o bien, en líneas de transmisión, también una de las ventajas principales es que a este tipo de técnica no le afecta la interferencia electromagnética. Se está generando conocimiento e investigaciones, para poder lograr las mediciones en otros rangos de CA, pudiéndose caracterizar otro tipo de cable y usando otro sensor de temperatura con un rango más alto de medición.

Así también se planea continuar con el proyecto y usar un sensor de temperatura de fibra óptica, ya que cómo sabemos

los sensores de fibra son una excelente opción en cuanto a rapidez en el tiempo de respuesta, sensibilidad y precisión.

Es importante resaltar el aporte del uso de este tipo de IA, como lo son las ANNs, ya que con el análisis que se ha llevado a cabo se comprueba que son una excelente opción para resolver este tipo de problemas, como lo son las mediciones indirectas con diferentes variables y magnitudes físicas.

### 4. Referencias

- [1] J.P. Holman, "Transferencia de calor", 8 Edición, McGRAW-HILL, 1998.
- [2] E.N. Miranda, S. Nikolskaia, R.Riba, E. Antonio, "Integrando calor y electricidad en la enseñanza de la física. Ingeniería", Revista Académica de la FI-UADY, 11-3, pp.15-20, 2007.
- [3] Lllamosa R, L. E., Gómez E., J. d., & Ramírez B., A. F. Diseño de un procedimiento para el cálculo de incertidumbre en mediciones indirectas. *Scientia et technica*, 2(42), 187-192, 2009.
- [4] Timothy J. Ross, "Fuzzy Logic With Engineering Applications", Third Edition, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2010.
- [5] Bonifacio Martín del Brío, Alfredo Sanz Molina, "Redes Neuronales y Sistemas Difusos", Segunda Edición Ampliada y Revisada, Alfa Omega RA-MA, 2001.
- [6] Pedro Ponce Cruz, "Inteligencia Artificial con aplicaciones a la Ingeniería", Alfaomega, 2010.
- [7] Fernando Izaurieta, Carlos Saavedra, "Redes Neuronales Artificiales", Universidad de Concepción, Chile.
- [8] Shahab Araghinejad, "Data-Driven Modeling: Using MATLAB in Water Resources and Environmental Engineering", Water Science and Technology Library, 2013.
- [9] Bose, N.K., Liang, P., Neural networks fundamentals with graphs, algorithms and applications, New York: McGraw-Hill, 1996.
- [10] Mauricio Sáchica Avellanda, Alexander Martínez López, "Fluke 8508a Multimeter introduction in capacitance measurement by indirect method", 29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014).
- [11] Topical Review, "Electrical current sensor: a review", IOPscience, 2010.
- [12] N. Rajkumar, V. Jagadeesh Kumar, and P. Sankaran, Fiber sensor for the simultaneous measurement of current and voltaje in a high-voltaje system, 2018.

# Prototipo opto mecatrónico para medir la intensidad de fluorescencia del ámbar amarillo traslucido

L. Nuñez<sup>a</sup>, R. Mota<sup>b</sup>, J. Camas<sup>c</sup>, R. Grajales<sup>d</sup>, M. Pérez

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

<sup>a</sup>alnuar.2402@gmail.com, <sup>b</sup>rmota@ittg.edu.mx

**Resumen**— En este trabajo se presenta un prototipo opto mecatrónico para medir la intensidad de fluorescencia generada por piezas de ámbar Chiapaneco amarillo traslucido. El arreglo experimental permite hacer incidir en las piezas de ámbar, un haz de luz ultravioleta de 405 nm, utilizando un micro espectrofotómetro C12880MA con un rango de sensibilidad espectral de 340 a 850 nm como elemento sensor de la luz fluorescente emitida por la muestra de ámbar. Se logró identificar la discrepancia existente entre piezas de diferentes procedencias dentro del estado de Chiapas. Muestras que fueron seleccionadas de minas, establecimientos comerciales formales e informales.

*Fluorescencia, espectrofotómetro C122880MA, ámbar chiapaneco amarillo.*

## 1. Introducción

La ley de refracción de Snell que instruye que la velocidad y ángulos incidentes de un haz de luz cambian de un medio a otro [1], de la misma manera, cambian las propiedades ópticas de los materiales al interactuar con la luz, a ese fenómeno se le conoce como fotoluminiscencia y tienen lugar entre las bandas de absorción de los 200 a 1000 nm [2] y es ampliamente utilizado para llevar a cabo que un compuesto orgánico cambie sus propiedades ópticas excitando los electrones de las bandas de valencia para generar fluorescencia [3,4], cabe resaltar, que en el ámbar la propiedad de fluorescencia no generan cambios significativos entre diferentes piezas de una misma tonalidad sin importar la edad lo que hace mantener una estrecha semejanza espectral [5].

Existen técnicas para determinar la intensidad de fluorescencia que presenta una pieza de ámbar como la Raman [6] que consiste en tomar como prioridad los valores de los índices de reflexión y refracción de las piezas para obtener la mayor cantidad de fluorescencia de las muestras, o por la conversión y cubicación de los datos de intensidad de fluorescencia utilizando la teoría TD SCF/DFT que consiste en la donación de electrones a las bandas de valencia para generar una intensidad mayor de fluorescencia [7] y se han reportado estudios que utilizan la transformada de Furrier conjunto a la espectroscopia Raman son capaces de identificar bandas

características para las piezas de ámbar e identificar si provienen de orígenes de acrilato y poliuretano [8].

En este trabajo se propone un prototipo opto mecatrónico para medir la intensidad de fluorescencia producido en el ámbar de tonalidad amarillo traslucido mediante la espectroscopia UV-visible utilizando un micro espectrofotómetro comercial para determinar la calidad de las piezas de ámbar y determinar su autenticidad, para llevarlo a cabo, se diseñó una interfaz para almacenar los datos y ser graficados.

## 2. Parte técnica del artículo

Tomando en cuenta que en los últimos años la tecnología ha desarrollado una diversidad de equipos en el área de optomecatrónica, proporcionando herramientas como los espectrofotómetros que cuentan con una configuración electrónica (Fig. 1) para permitir una mayor captación de radiación luminosa por parte del fototransistor, proporcionando una mayor sensibilidad y precisión de adquisición de datos [2,9,10].

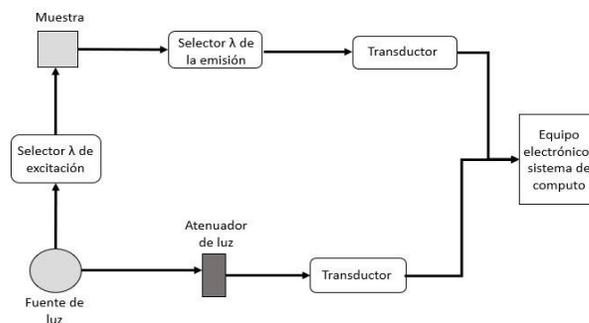


Fig 1. Diagrama de configuración de espectrofotómetros y espectrofluorómetros.

En la Figura 2, se muestra la configuración experimental para llevar a cabo la obtención de intensidades en el ámbar amarillo se utilizó un micro espectrofotómetro comercial Hamamatsu C12880MA (1) con un rango de adquisición de datos espectrales de 340 a 850 nm, un diodo láser Sony SLD3231VF

(2), un filtro óptico NF405-13 (3), una tarjeta electrónica Arduino uno (4) y una PC (5) para procesar los datos obtenidos.

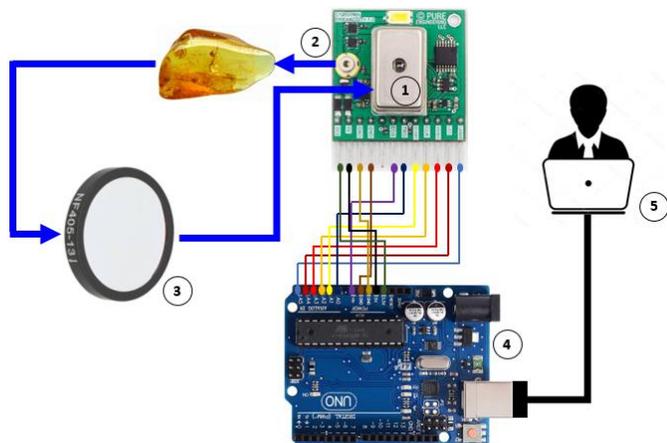


Fig 2. Diseño experimental para obtención de fluorescencia del ámbar.

Utilizando el arreglo experimental (Fig. 2) se procedió al estudio de fluorescencia en piezas de ámbar de tonalidad amarillo originarias del estado de Chiapas provenientes de minas de Simojovel de Allende y de establecimientos comerciales formales e informales (ambulantes). Se aplicó el procedimiento normalizado de pulido de las muestras hasta obtener un grosor de aproximadamente 2 mm y con un área aproximada de 5cm<sup>2</sup> (especificación NOM-152-SCFI-2003) (Fig. 3). Se hace incidir un haz de luz ultravioleta proveniente de un diodo láser de 405 nm.



**Ámbar de la mina**      **Ámbar ambulante**      **Ámbar de establecimiento formal**

Fig 3. Muestras de ámbar para experimentación.

Al realizar la experimentación utilizando el ámbar excavado de la mina y proporcionado por artesanos chiapanecos, se observó que la fluorescencia de dichas muestras sobrepasaba ampliamente la intensidad emitida por el láser de bombeo como se observa en la Figura 4.

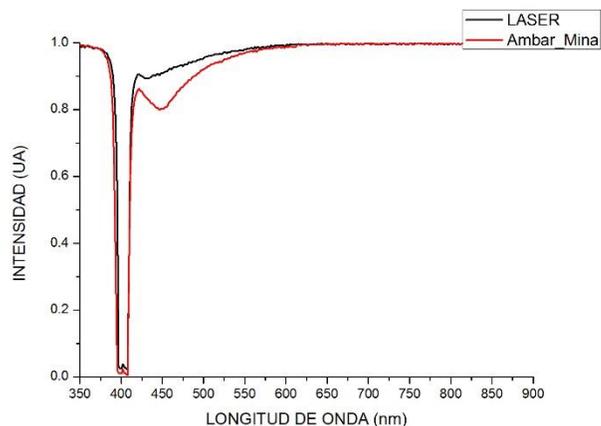


Fig 4. Intensidad de fluorescencia de un ámbar obtenido de la mina.

La prueba con el ámbar obtenido por comerciantes ambulantes obtuvo una reacción fluorescente inferior, la intensidad de fluorescencia presentada estuvo por debajo de la intensidad del láser y se observa en la Figura 5.

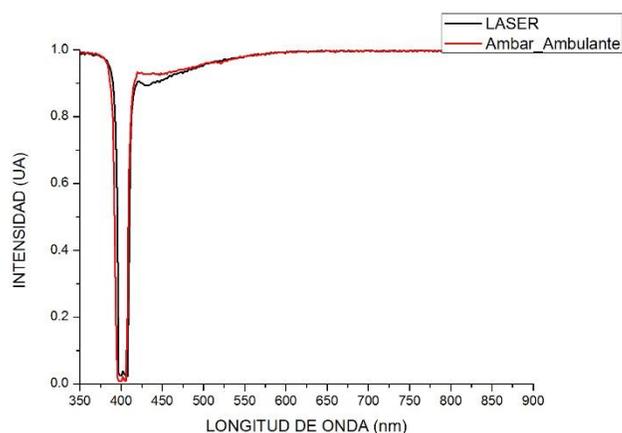


Fig 5. Intensidad de fluorescencia del ámbar obtenido de un ambulante.

Las muestras de ámbar proporcionadas por comerciantes con negocios establecidos legalmente al someterlos a la prueba de fluorescencia utilizando el prototipo se obtuvo una respuesta de intensidad de fluorescencia mayor que la luz incidente por el láser como se observa en la Figura 6.

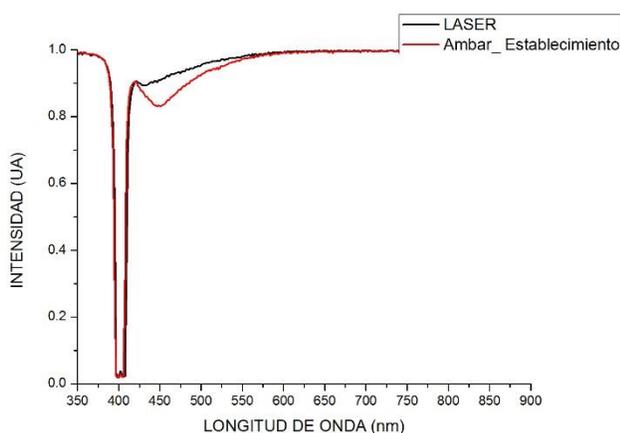


Fig 6. Intensidad del ámbar obtenido de establecimiento legal.

Los resultados de las intensidades de fluorescencia y longitudes de onda proporcionadas por las piezas de ámbar obtenidas de la mina (Fig. 3), comerciantes ambulantes (Fig. 4) y de establecimientos legales (Fig. 5) al ser sometidas a una luz ultravioleta de 405 nm se concentran la Tabla I.

Tabla I. Tabla de concentrado de intensidad de fluorescencia y longitud de onda del ámbar

Procedencia del ámbar	Intensidad de fluorescencia (UA)	Longitud de onda (nm)
Mina	0.80	449.32
Comerciantes ambulantes	0.92	446.58
Comerciantes establecidos	0.83	449.32

### 3. Conclusiones

Los estudios realizados utilizando la longitud de onda de onda de 405 nm en piezas de ámbar amarillo generan una intensidad de fluorescencia que sobrepasa por mucho la intensidad emitida por el láser de bombeo y corroborando con la literatura que no existen grandes discrepancias entre piezas que tienen diferentes edades o provienen de distintos lugares. En el análisis de los resultados, se encontró que las muestras que generan una fluorescencia menor a la intensidad de la luz incidida en la longitud de onda de 405 nm, es una pieza de alta pureza o bien un ámbar falso.

### 4. Referencias

[1] P. A. Tripler, G. Mosca, Física para la ciencia y la tecnología: Electricidad y magnetismo, luz, física moderna, Reverté, 2005.  
 [2] J. L. Santos, F. Farahi, Handbook of optical sensors, Crc Press, 2014.

[3] F. J. Holler, T. A. Nieman, D. A. Skoog, Principios de análisis instrumental, McGraw-Hill Interamericana de España, 2001.  
 [4] B. R. Masters, «Molecular Fluorescence: Principles and Applications,» *Journal of Biomedical Optics*, vol. 18, nº 3, p. 039901, 2013.  
 [5] M. Havelcová, V. Machovič, M. Linhartová, L. Lapčák, A. Přichystal, Z. Dvořák, «Vibrational spectroscopy with chromatographic methods in molecular analyses of Moravian amber samples (Czech Republic),» *Microchemical Journal*, pp. 153-160, 2016.  
 [6] R. Espinosa-Luna, C. Frausto-Reyes, G. López-Morales, «Optical characterization of amber of Chiapas,» *Revista Mexicana de física*, nº no. 3, pp. 217-221, 2014.  
 [7] L. G. Feng, L. J. Hui, «Investigation on three-photon absorption induced upconversion fluorescence properties of two fluorene-based derivatives,» *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, pp. 184-188, 2017.  
 [8] D. W. Farwell, H. G. M. Edwards, «Fourier transform-Raman spectroscopy of amber,» *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 52, nº 9, pp. 1119-1125, 1996.  
 [9] J. R. Lakowicz, Principles of fluorescence spectroscopy, Springer Science & Business Media, 2013.  
 [10] N. V. Tkachenko, Optical spectroscopy: methods and instrumentations, Elsevier, 2006.

### 5. Biografías

Luis Alejandro Nuñez Alegria obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Electrónica egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente se encuentra finalizando la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Se encuentra en proceso de redacción de la Solicitud de un Modelo de Utilidad que será Ingresado en los próximos meses al Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, IMPI. Se encuentra en espera del ingreso de los documentos en el Instituto Nacional del Derecho de Autor, INDAUTOR.

Rafael Mota Grajales es Ingeniero Industrial Electricista egresado del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Aplicaciones Industriales egresado del Instituto Tecnológico de la Laguna. Miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Chiapas, es Profesor del Instituto Tecnológico De Tuxtla Gutiérrez, actualmente imparte clases

en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Ha sido Representante Institucional ante el PRODEP. Ha ocupado el cargo administrativo de la Jefatura del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Ha ocupado el cargo de Jefe de Proyectos de Investigación de Ingeniería Eléctrica. Ha sido nombrado Perfil PRODEP en 2015. Ha recibido la certificación de Diseño Mecánico en SOLIDWORKS nivel asociado. Ha dirigido 3 tesis de Maestría. Miembro del Cuerpo Académico en Consolidación ante el PRODEP, Automatización y Control. Cuenta con 6 Solicitudes de Patente Registradas ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, IMPI. Tiene un proyecto de investigación PROINNOVA de CONACYT. Ha realizado 6 publicaciones arbitradas en Congresos Internacionales. Ha publicado 3 Artículos en Revistas Indizadas. Su Área de interés incluye Fuentes Limpias, Instrumentación y Control Industrial.

Jorge Luis Camas Anzueto obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y Electrónica. Obtuvo su grado de doctor en Ciencias con Especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y electrónica. Ha publicado diversos artículos Nacionales e Internacionales, presentado Conferencias y dirigido varias Tesis de Licenciatura y de Maestría. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, Miembro Estatal de Investigadores Miembro Honorífico, Perfil deseable ante PRODEP desde 2010 a la fecha. Ha escrito 34 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en JCR, Escrito 12 artículos en revistas de otros índices, más de 50 memorias de congreso nacional e internacional.

Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó una estancia Posdoctoral (2 años) en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, ha publicado 12 artículos de riguroso arbitraje a nivel internacional, más de 20 congresos internacionales. Sus investigaciones están dirigidas en el estudio teórico, numérico y experimental de nuevas arquitecturas de switches ópticos de fibra, en particular interferómetros de Sagnac para el procesamiento digital todo-óptico, la caracterización de trenes de pulsos ópticos ultracortos y el amarre de modos pasivo y desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados

ajustables y a múltiples longitudes de onda. Actualmente imparte clases en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Madaín Pérez Patricio obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, obtuvo su grado de Doctor en Automatización e Informática Industrial por la Universidad de Lille, Francia. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, Miembro Estatal de Investigadores Nivel 2, Perfil deseable ante PRODEP desde 2012-2015. Ha escrito artículos arbitraje en revistas indizadas en JCR.

# Co-Simulación en un Robot Scara con Gripper Subactuado

H. León<sup>1, a</sup>, M. Pérez<sup>1, b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica del Valle de México, Posgrado en Ing. de Manufactura, División de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> [h.leon@cinvestav.mx](mailto:h.leon@cinvestav.mx)

<sup>b</sup> [ing.miguel.perez.upvm@gmail.com](mailto:ing.miguel.perez.upvm@gmail.com)

**Resumen**—El control de movimiento en dispositivos automáticos permite generar rutas de posición, velocidad, aceleración, y la combinación de secuencias en los motores. El objetivo de esta investigación es desarrollar una aplicación de control de movimiento integrando ambientes gráficos y virtuales en un prototipo de robot con gripper subactuado de cuatro grados de libertad. La metodología consiste en: 1) Diseño del robot; 2) Construcción del diagrama de control; 3) Configuración entre Softmotion-Solidworks; 4) Construcción de la interfase; 5) Comunicación con Arduino. El desarrollo de esta integración requiere el uso de hardware que soporte los ambientes de simulación y comunicación, así como la conversión de señales analógicas de los potenciómetros utilizados, y su interpretación en el diagrama de control, mediante polinomios de Lagrange. El uso de equipo para ensamble de robots acelera el proceso de aprendizaje en el desarrollo de prototipos, y reduce el impacto en los costos para desarrollar estas tecnologías.

*Palabras clave.* Robot Scara, Co-Simulación, Control, LabVIEW.

## 1. Introducción

El control de movimiento, (CM), es un subcampo de la automatización que enfatiza el uso de los sistemas involucrados en el movimiento de partes de maquinaria de forma controlada, y se integra por el software de aplicación, los controladores, amplificadores, motores y dispositivos de retroalimentación, los cuales permiten analizar, una posición, velocidad, o, aceleración específica, en función de ciclos de lazo cerrado, y son fundamentales para comprender cadenas cinemáticas cerradas, o, abiertas.

La Co-Simulación, también llamada simulación cooperativa, es una metodología que permite simular el comportamiento motriz de un diseño mecánico en ambientes virtuales, usando interfaces de comunicación, que facilitan la integración con aplicaciones de programación y CM, donde se desarrollan desde la Interface Hombre-Máquina (HMI), el diagrama de bloques, y, la vinculación mediante tarjetas de control, como Arduino con los dispositivos físicos [1].

El uso de tecnologías educativas para el desarrollo de Ciencias, Tecnología, Ingeniería, y, Matemáticas (STEM), como Lego NXT, Lego EV3, Tetrax-Robotics, y, Vex-IQ, permiten consolidar una plataforma de grandes posibilidades para la enseñanza y el aprendizaje acelerado sobre el Diseño para la manufactura y el ensamble, así como para el Diseño Mecatrónico, ya que simplifican el proceso de “Pensar-Hacer-Probar” respecto a un problema o una idea.

Entre las problemáticas actuales para el CM, de máquinas y elementos mecatrónicos, no existen a la fecha, aplicaciones que

permitan soportar el control, animación gráfica, física, y modelación numérica, embebidas en un solo sistema, debido a los altos requerimientos de poder en procesamiento computacional, [2]. Además, el uso de técnicas de Co-Simulación, permite analizar el estudio de posturas singulares e indeseables en los robots mediante elipsoides de manipulabilidad, es decir, entre más lejos se encuentra el robot de una singularidad, el dispositivo, podrá moverse mejor, de forma más uniforme, y podrá aplicar fuerzas uniformemente en todas las direcciones, [3].

Algunos estudios relacionados al tema se encuentran en [4], donde se diseña un captador solar con seguimiento, mediante un robot Delta, aplicando SolidWorks-Softmotion-LabVIEW; el estudio de simulación y control de manipuladores, realizado con SolidWorks-Adams-Matlab, [5]; el estudio del control PID en un Segway con acelerómetros, fue realizado con Catia-LabVIEW-Lego, [6]; el control de un robot móvil, con LeoCad-V-Rep-Matlab, por medio de Linux y Windows, a través de una arquitectura de capas para la API (Application Programming Interface) de V-REP con Matlab, [7]. También se han planteado técnicas de control complementario en rehabilitación con dispositivos hápticos para pacientes con discapacidad motriz, [8].

Algunos rasgos distintivos respecto a los trabajos anteriores, se aprecian en: 1) Utilización de tecnologías STEM-VEX IQ para la construcción del brazo robótico [9]; 2) Diseño de efector final subactuado (EFS), con falanges flexibles, adaptable a formas cilíndricas e irregulares; 3) Elaboración de componentes con manufactura aditiva (MA), utilizando filamento de ABS, y PLA flexible; y, 4) El control dual, en ambiente virtual-real, integrando las tarjetas controladoras Cortex Vex-Net y Arduino.

La hipótesis, se fundamenta en la factibilidad de establecer el control del robot y su EFS en tiempo real. A continuación, se muestra la metodología aplicada, seguido del diseño mecánico del robot, el diagrama de control de motores en LabVIEW, (LV), se menciona la API de SoftMotion, la interfaz HMI, y finalmente la configuración de comunicación con Arduino.



Ultimaker, 3.4.0, los filamentos son de 1.75 mm de PLA Soft-Flexible y ABS.

TABLA I. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DEL ROBOT

Nombre	Transmisión Mecánica	Transductor (Potenciómetros)	Motores (2 hilos 393)
Hombro J1	1 engrane 60 dientes, 1 piñón 12 dientes	1	1
Codo-J2	3 engranes 60 d c/u, 1 piñón 12 d	1	1
Eje-Z (mm)	1 cremallera de 25 cm, 1 engrane de 60 d, 1 piñón de 12 dientes	1	1
Gripper	2 tornillos sinfin	1	2

La descripción de componentes es: 1) Eslabón de amortiguación; 2) Empotramiento; 3) Eslabón motriz; 4-5) Mecanismos de transmisión de movimiento; 6) Dedo o Falange, en ABS; 7-9-11) Eslabonamientos con PLA Flexible; 8-10) Eslabones Falange de ABS; 12) Tornillo Sinfin de Acetal; 13) Transmisión Sinfin-Engrane de eslabón de amortiguación; 14) Motor Vex, ver Fig.4.

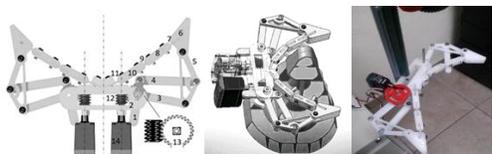


Fig.4. Gripper Subactuado impreso en 3D

#### E. Administrador de movimientos en Solidworks

Esta herramienta de diseño, permite trabajar tres tipos de estudio de movimientos para mecanismos y máquinas: 1) Animación; 2) Movimientos básicos; y, 3) Análisis cinemático. Dependiendo del movimiento, se tienen configuraciones de tipo libre, cinemático-dinámico, así como movimiento punto a punto, por acoplamiento, motores rotatorios, lineales, gravedad, contacto, con amortiguamiento, y análisis de fuerzas, [10]. En la tabla 2, se indican los parámetros de movimiento rotacional, y lineal aplicados.

TABLA II. PARAMETROS EN MOTION DE SOLIDWORKS

Articulación	Tipo	Rango	Tiempo	Tipo animación
Hombro J1	(R)	0-180°	3 seg	Motor Rotatorio
Codo J2	(R)	0-90°	3 seg	Motor Rotatorio
Eje z (mm)	(P)	0-8 in	3 seg	Motor lineal
Gripper	(R)	0-40°	2 seg	Motor Rotatorio

En Fig.5, se muestra el administrador de movimiento del robot, en su forma simplificada.

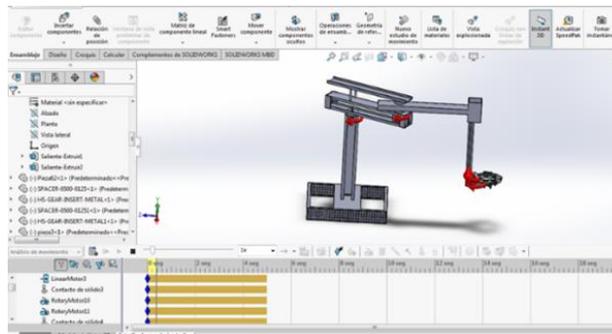


Fig. 5. Administrador de movimiento del robot SCARA

#### F. Diagrama de Control de Motores en LabVIEW

El movimiento de los motores es regulado por la lectura que ofrecen los potenciómetros, cuyo valor de voltaje varía de 0 a 5 volts en la placa Arduino. Los potenciómetros registran señales analógicas, y el diagrama de control en LabVIEW, utiliza bloques de función que pueden leer este tipo de señales. Los rangos de lectura van desde 0 a 4096, sin embargo, los valores funcionales se obtuvieron de forma experimental. La interpolación de Lagrange fue utilizada, para calcular los grados correspondientes a cada valor del potenciómetro, como se muestra en la tabla 3.

TABLA II. LECTURA EXPERIMENTAL DE POTENCIOMETROS

Variable	Articulación 1 (Rotacional)		
	Origen	Intermedio	Máximo
Potenciómetro (X)	500	1868	3500
Desplazamiento (Y)	0°	90°	180°
Articulación 2 (Rotacional)			
Potenciómetro (X)	664	1892	3504
Desplazamiento (Y)	0°	90°	180°
Articulación 3 (Prismática)			
Potenciómetro (X)	232	2150	4064
Desplazamiento (Y)	0 cm	10 cm	20 cm
Articulación 4 (Rotacional)			
	Cerrar	Abrir	
Potenciómetro (X)	0°	40°	
Desplazamiento (Y)	1250	300	

Las ecuaciones 1, y, 2, describen el comportamiento de los potenciómetros y el desplazamiento angular en los motores, de las articulaciones 1 y 2.

$$y(x) = (-35E - 7)x^2 + (0.07419)x - 36.20807 \quad (1)$$

$$y(x) = (-605E - 8)x^2 + (0.089)x - 56.387 \quad (2)$$

La ecuación 3 describe, el desplazamiento lineal sobre la cremallera.

$$y(x) = \frac{x-232}{479} \quad (3)$$

La última ecuación, describe el comportamiento de cierre y apertura del gripper, mediante los motores 4, y 5, los cuales tienen el mismo comportamiento, por lo que la ecuación aplica para cada uno de ellos, con la diferencia en el sentido de giro.

$$y = (-0.0421)x + 52.632 \quad (4)$$

Las ecuaciones resultantes son introducidas en el diagrama de control, en una estructura “case”, para detectar el desplazamiento y mandar la posición respectiva, a los 5 motores en el motion manager de SolidWorks, ver Fig.6.

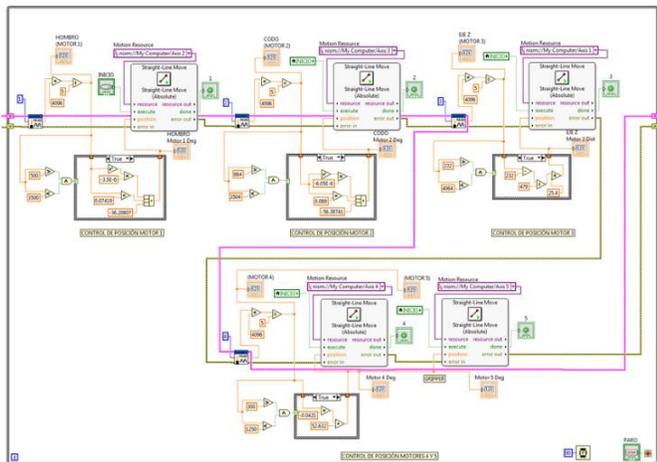


Fig. 6. Diagrama de control en LabVIEW

### G. Configuración y Comunicación mediante Softmotion-Solidworks

Es necesario, tener instalada la API de Softmotion de National Instruments, y seleccionar tantos ejes, como motores se tengan en el ensamble. Además, es necesario configurar los ejes de los motores, ver Fig.7.

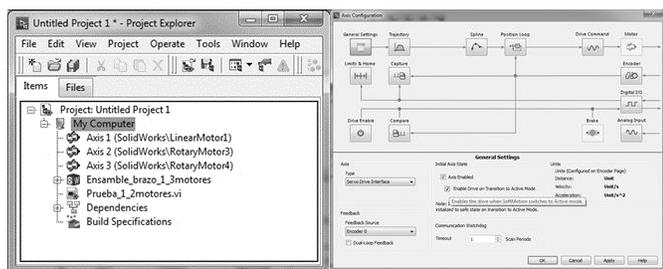


Fig. 7. Configuración de ejes motrices en softmotion

### H. Construcción de interfaz para el movimiento de motores

En Labview, se tienen 2 aplicaciones complementarias, el diagrama de bloques, y el instrumento virtual (VI). Este último es un tipo de panel frontal para dar forma a los indicadores, y botones de control, el cual se diseña conforme a las necesidades del usuario. La interfaz considera el valor de los potenciómetros, y las posiciones del robot. Ver Fig.8.

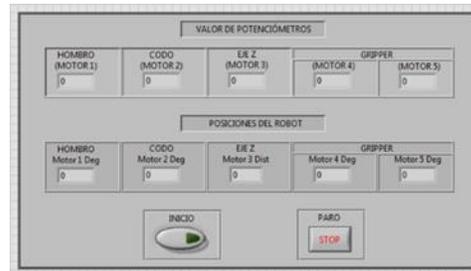


Fig. 8. Interfase de control en LabVIEW

### I. Configuración y comunicación con Arduino

En esta etapa se instala el software de Arduino [11], el administrador de paquetes de Instrumentos Virtuales para LabVIEW, Package Manager [12], y la aplicación LIFA Base, [13]. Posteriormente se ejecuta el Arduino, y se definen tanto el tipo de tarjeta controladora y el puerto de comunicación. En LabVIEW se construye el diagrama de bloques, estableciendo el número de servos a utilizar, y su configuración, asignando a cada uno de ellos los pines digitales de entradas y salidas I/O.

### 4. Conclusiones

La Co-Simulación es una herramienta poderosa para la integración de ambientes virtuales y reales, sin embargo, se requiere poder computacional para el procesamiento de animaciones y control sobre trayectorias deseadas. Las herramientas STEM, y la impresión 3D, ayudaron a reducir los tiempos de diseño y ensamble. Si bien, fue creada una aplicación que soporta el control, y la animación gráfica, no es posible integrarla en un solo sistema. El módulo de motion en SolidWorks, por sí solo, es lento, no es en tiempo real, y es necesario hacer un análisis por cada posición deseada, lo cual, implica una alta tasa de probabilidad de errores de posición.

La vinculación con LabVIEW permitió modificar los parámetros deseados y ejecutarlos. La interfaz eliminó la necesidad de desarrollar código para usar el robot, haciendo que este sea más preciso, fácil de programar y arrancar.

Gracias a la existencia de elementos de sensado, actuación, y procesamiento, se facilitó el ensayo de prueba y error, por lo que se logró exitosamente, el movimiento virtual del robot y su movimiento físico. En Fig. 9, y, Fig.10, se muestra la trayectoria realizada, por el robot SCARA, así como la interfaz utilizada, y el monitoreo de motores en Softmotion.

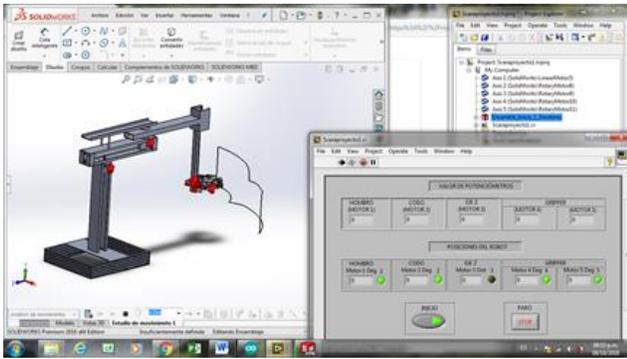


Fig. 9. Co-Simulación, posiciones activas

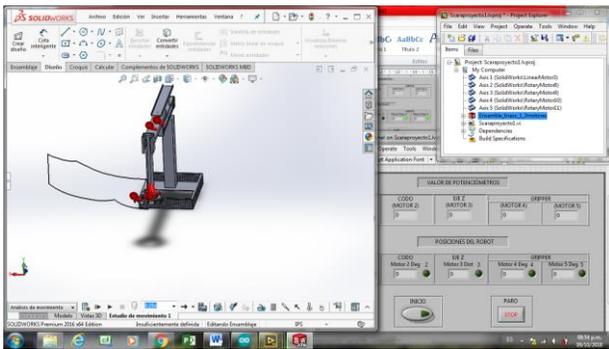


Fig. 10. Co-Simulación, posiciones desactivadas

Entre las recomendaciones finales, se puede mencionar que existen otras herramientas, complementarias a la Co-Simulación, las cuales aceleran el proceso de aprendizaje, como Linx, o, Myopenlab, [14], que reducen el peso computacional, y, la complejidad en el control, las cuáles pueden utilizarse para simplificar el desarrollo de todo el sistema, en futuras investigaciones.

## 5. Referencias

- [1] J. Gudiño-Lau, F. Chavéz-Montejano, “Sistema de Co-Simulación de un robot industrial para control”. Revista de aplicación científica y técnica, 2-6:22-29, 2016
- [2] E. Jiménez-López, K. Fierro-Ruiz, A. López-Martínez, J. Rivera-Nieblas, J. Delfín-Vázquez, “Desarrollo de un sistema computacional para robot paralelo utilizando simulación cooperativa”. Innovaciones en Mecatrónica. Asociación Mexicana de Mecatrónica. ISBN: 978-607-9394-11-0, 2017. Disponible en: <http://www.mecamex.net/Libros/2017-Libro-InnovacionesEnMecatronica.pdf>
- [3] J. Craig, “Robotica”, 3ª edición. Pearson, Prentice Hall, 2006
- [4] M. Mbomba, “Analysis and Simulation of Parallel Robots for Sun Tracking Using a CAD – Based Approach”. Dissertation submitted for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Instituto Superior Técnico – IST (Portugal), 2010.
- [5] J. Verde-Lampon, J. Gudiño-Márquez, J. Gudiño-Lau, J. Alcalá-Rodríguez, S. Charre-Ibarra, M. Duran-Fonseca, “CoSimulación de un Robot Delta para Control”, Robótica y Mecatrónica, Capítulo 44, pp. 552-565, 2018. Disponible en: <http://www.mecamex.net/Libros/2018-Libro-Robotica-y-Mecatronica.pdf>
- [6] 3DS Academy, “LEGO Mindstorms Virtual Experience, A Cyber-Physical approach to Extend LEGO MINDSTORMS learning experience”, Disponible en: <https://academy.3ds.com/en/lab/lego->

[mindstorms-virtual-experience;](https://academy.3ds.com/en/lab/internet-of-things)

<https://academy.3ds.com/en/lab/internet-of-things>

- [7] A. Martín-Domínguez, “Modeling and Simulation of a LEGO Mindstorms EV3 Robot with V-REP and Matlab”, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. Universidad de Málaga, 2016.
- [8] O. Domínguez-Ramírez, V. López-Morales, R. Samperio-Llano, “Interacción Háptica en Laberintos Virtuales, con Propósitos de Diagnóstico en Pacientes con Discapacidades Neuropsicológicas” 2016 Disponible en: <http://www.mecamex.net/Libros/2018-Libro-Robotica-y-Mecatronica.pdf>
- [9] VEX Robotics. Disponible: <http://www.vexrobotics.com.mx/vexedr/descripcion.php?id=motors;> [https://content.vexrobotics.com/docs/instructions/276-2177-instr-0414\\_v2.pdf](https://content.vexrobotics.com/docs/instructions/276-2177-instr-0414_v2.pdf) <http://www.vexrobotics.com.mx/vexedr/descripcion.php?id=276-2216;> <http://www.vexrobotics.com.mx/vexedr/descripcion.php?id=motors>
- [10] Solidworks. (2010). Creating Animations with Solidworks, step by step. Dassault Systemes Solidworks.
- [11] Arduino. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
- [12] Package Manager. Disponible en: <https://vipm.jki.net/>
- [13] LIFA Base. Disponible en: [https://vipm.jki.net/package/national\\_instruments\\_lib\\_labview\\_interfac\\_e\\_for\\_arduino](https://vipm.jki.net/package/national_instruments_lib_labview_interfac_e_for_arduino)
- [14] MyopenLab. Sitio web: [www.myopenlab.org](http://www.myopenlab.org)

## 6. Biografías

Horacio León Camacho, Doctor en Ciencias, especializado en Energía Renovable, Sistemas Híbridos, Diseño Mecatrónico, y Robótico, así como en Técnicas de Impresión 3D, fundador de la Start-Up, Genius-Tech, trabaja para la Universidad Politécnica del Valle de México, en la División de Ingeniería Industrial, en el Laboratorio de Tecnologías Inteligentes.

Miguel A. Pérez Terreros, Ingeniero Mecatrónico, con Especialidad en Sistemas de Manufactura, trabaja para la Universidad Politécnica del Valle de México, en la División de Ingeniería Industrial.

# Obtención de un modelo termoplástico, aprovechando la ceniza de la biomasa proveniente del despulpado del cacao y el reciclaje de PET, mediante un horno compresor automatizado con Software LabView y Hardware Arduino.

Arly Darío Rincón-Quintero<sup>1,a</sup>, Alexander Meneses-Jácome<sup>1,b</sup>, Luis Alfonso del Portillo-Valdés<sup>2,c</sup>, Johan Fabián Santander-Rivera<sup>1,d</sup>, Jainer Enrique Lizcano-Espinel<sup>1,e</sup>, Sergio Mauricio Amado-Morales<sup>1,f</sup>

<sup>1</sup> Unidades Tecnológicas de Santander, Ingeniería Electromecánica, Grupo de Investigación DIMAT.

<sup>2</sup> Universidad del País Vasco UPV/EHU, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Grupo de Investigación ENEDI.

<sup>a</sup> arincon@correo.uts.edu.co, <sup>b</sup> ameneses@correo.uts.edu.co, <sup>c</sup> luis.delportillo@ehu.eus, <sup>d</sup> santander\_1293@hotmail.com, <sup>e</sup> jeles0194@hotmail.com, <sup>f</sup> sergio.amado.morales@hotmail.com

**Resumen**— Esta investigación se basa en la obtención de un modelo termoplástico híbrido, compuesto por mezcla de Polipropileno virgen (PP), envases de botellas recicladas (R-PET) y cenizas de la vaina seca del cacao (CVSC).

Para la automatización del horno, se crea un aplicativo con Software LabVIEW y Hardware Arduino. Además, se realiza el diseño de un molde que permita la desgasificación en el proceso y un sistema de compresión neumático, basados en parámetros de temperatura de operación y tiempo de fusión de la materia prima.

El resultado final, muestra un modelo óptimo que contiene 60% de PP, 20% de R-PET y 20% de CVSC en fracción másica. La morfología externa de la placa presenta un color grisáceo. La densidad disminuye y las propiedades de biodegradabilidad aumentan por la adición de CVSC que aporta CaO, que a su vez absorbe CO<sub>2</sub> del ambiente, produciendo condensación en la superficie de la placa.

*Palabras clave.* Polímeros termoplásticos, Moldeado por compresión, PET reciclado, CVSC, LabVIEW, Arduino.

## 1. Introducción

Actualmente a nivel mundial se presentan fenómenos naturales drásticos producto de la degradación del medio ambiente. Una de las principales formas de contaminación es por residuos sólidos desechados, entre ellos los plásticos, que al final de la cadena terminan llegando a los mares y en general a los ecosistemas, afectando la naturaleza [1].

Durante esta investigación se propone la reutilización de los residuos plásticos, principalmente los generados por envases PET, e incluirlos en una línea de trabajo en donde se puedan agregar correctamente en la fabricación de nuevos productos [2], [3]. Además, se busca el aprovechamiento de los residuos agroindustriales asociados al despulpado del cacao, luego de que esta biomasa haya sido quemada en un horno secador para aprovechar el poder calorífico de la misma y se obtengan las cenizas desechadas (cenizas de la vaina seca del cacao – CVSC) [4]–[9], que al final se introducirán en una mezcla con polímeros.

Lo anterior, busca diseñar mezclas óptimas entre polímeros de origen (e.g Polipropileno PP) y reciclados (e.g. Envases de

botellas R-PET), con la adición porcentual de CVSC. Todo ello, con el fin de obtener un modelo termoplástico híbrido, implementando en este caso, un método de compresión neumática por medio de Software LabView y Hardware Arduino, donde se controlen las temperaturas y los tiempos de fusión. Estandarizando la presión de aplicación y la temperatura.

## 2. Materiales y Metodología.

### 2.1 Polímeros Termoplásticos y Vaina seca de cacao

Los termoplásticos son utilizados en la fabricación de piezas poliméricas, estos se caracterizan porque se pueden calentar y obtener diferentes formas deseadas [10]. Esto es posible aumentando la temperatura del material, pasando por una zona donde las cadenas se rompen y trasciende a un estado líquido de alta viscosidad, luego de esto, el material alcanza la temperatura de fusión que es donde se mezcla completamente y se pueden enlazar las cadenas en el proceso de enfriamiento para la formación de la nueva estructura uniforme [11].

Es importante distinguir que la composición principal de los polímeros, son átomos de carbono e hidrogeno (Hidrocarburos). Del gas natural y del petróleo crudo, proviene la materia prima que se conoce como monómero y que a través de un proceso de polimerización, el cual es de carácter químico, se logra el enlace de cadenas largas para finalmente obtener la resina del material [12], como por ejemplo el Polipropileno PP y el tereftalato de polietileno PET.

#### 2.1.1 Polipropileno PP

El polipropileno se obtiene por reacción química de un proceso de polimerización catalítica de los monómeros del mismo, obtenidos de los hidrocarburos, se encuentran en tres clases, que dependen de su estructura, entre estos están: El

PP Isotáctico, en el que los grupos de metilo se encuentran ubicados al mismo lado de la cadena de carbono, en él se distingue que tiene un alto grado de cristalinidad por lo que posee buenas propiedades mecánicas; el PP Sindotáctico, su cadena polimérica se caracteriza porque los grupos de metilo alternan los lados, esta variedad lo hace más flexible y por esto posee mayor resistencia al impacto.

El tercer tipo es el Atáctico, en su estructura, los grupos de metilo se distribuyen aleatoriamente, posee baja cristalinidad, es suave y pegajoso, su aplicación es en componentes como adhesivos. En general, el PP, tiene buenas propiedades mecánicas de resistencia, comportamiento dieléctrico y disipador de fuego, es muy empleado en la industria automotriz, productos hospitalarios, elementos domésticos, entre otras aplicaciones [13]. Además, tiene un buen comportamiento para acoplarse con fibras de otros compuestos de origen sintético, así como de origen biológico. Una de las mezclas que se ha empezado a desarrollar en los últimos años es utilizando fibras de PET [14].

### **2.1.2 Tereftalato de polietileno PET**

El poli (Tereftalato de etileno) como se conoce este polímero, se obtiene a través de la reacción de tereftalato de dimetilo con etilenglicol. El PET tiene diversas aplicaciones en la industria textil, en la producción de componentes eléctricos y electrónicos, en películas poliméricas, y el uso más común que es en envase de productos. Este polímero amorfo es favorable en la industria, esto debido a su transparencia, resistencia y rigidez; se obtiene mediante los diferentes procesos mecánicos de moldeo, como compresión, inyección y extrusión; en estos dos últimos procesos como etapa final, se realiza un enfriamiento de tal manera que el material se cristalice rápidamente.

La desventaja de este material, es su bajo costo y amplio uso cotidiano, donde se desecha en grandes cantidades directamente hacia el ambiente, lo que constituye un problema ambiental, aunque actualmente, se desarrollan investigaciones para la reutilización de este; principalmente, como materia prima en la producción de nuevos polímeros, en concreto y muchas más aplicaciones, donde actúa como material minoritario, combinando las propiedades en las mezclas de aplicación [15].

### **2.1.3 Mezclas entre polímeros**

La producción actual de polímeros termoplásticos, se da a través de procesos de compresión, inyección y extrusión, que transforman generalmente pellets o materia prima virgen en diferentes productos formados a través de moldes; cada material tiene propiedades mecánicas particulares, propias de la composición química de sus estructuras. Sin embargo, con el fin de producir polímeros con diferentes propiedades, se

realizan mezclas con diferentes fibras, cambiando las características del material producido. De esta manera se presenta el caso de la reutilización, donde se mezclan en menor medida con material virgen y así se pueden obtener materiales con las mismas propiedades o cambios en ellas.

Los materiales de las mezclas, deben generar compatibilidad, para que se puedan enlazar sus cadenas y así tener un material homogéneo, con mejoras en sus propiedades. Se han desarrollado algunas investigaciones en la mezcla del PP y el PET. [16] reutilizaron hasta un 30% de PET reciclado en la mezcla con PET virgen, manteniendo las propiedades en la producción de botellas fabricadas con este material. En otra investigación [17], mezclaron PP con 5% de PET reciclado y lograron mejorar la resistencia a la tracción.

Es importante mencionar, que actualmente, se realizan adelantos en el uso de un compatibilizador, que ayudaría a la reticulación de la cadena del polímero que se está produciendo.

### **2.1.4 Vaina seca de Cacao**

El cacao es un producto con excelentes propiedades alimenticias [8] que se cosecha en diferentes regiones del territorio Colombiano. En Santander, por ejemplo, se produce el 38 % de la producción nacional, en 2018, se alcanzaron a producir las 56867 Toneladas [18]. Cabe destacar, que el cacao colombiano ha sido premiado a nivel internacional por la calidad del producto. Aunque, las técnicas de postcosecha que se implementan actualmente, resultan rudimentarias y es necesaria la tecnificación de estas. Cuando se realiza el procesamiento del fruto de cacao, se generan residuos en grandes proporciones y representan una problemática por su naturaleza lignocelulósica, este tipo de material representa aproximadamente el 60% de la biomasa vegetal; normalmente, se utiliza como fertilizante de suelos y su degradación se realiza directamente hacia el ambiente, sin ningún tratamiento, generando focos de microorganismos y plagas, siendo un residuo sólido biodegradable [9].

### **2.1.5 Mezcla entre polímeros y CVSC obtenidas de la biomasa residual del cacao.**

En la investigación de [19], se llevó a cabo la caracterización de las propiedades de espumas de poliuretano incorporándole desechos de cascara de cacao, con el fin de reutilizarlo en otros procesos; destacando la capacidad de absorción y retención de agua, los grupos de OH que posee y su alta biodegradabilidad. Lo anterior, permite analizar sobre nuevos materiales que se forman al mezclar residuos o biomasa residual de origen biológico con diferentes tipos de polímeros, donde se logra reducir los tiempos de degradación e impactar positivamente hacia el ambiente.

## 2.2 Metodología para la Obtención del modelo termoplástico, aprovechando la biomasa del despulpado de cacao y el reciclaje de Tereftalato de Polietileno PET.

Para la fabricación del modelo termoplástico, se realiza la selección de los materiales que lo conforman. Se emplea resina de PP, PET reciclado en forma de escamas (R-PET), obtenidas del triturado de botellas de refrescos y cenizas de la vaina seca del cacao CVSC, provenientes de la combustión de estas, donde se aprovecha inicialmente el poder calorífico de las mismas en un proceso de secado. Se busca entonces, diseñar mezclas en proporciones másicas entre estos componentes y mediante un proceso de compresión neumática, establecer un diseño óptimo para la obtención del modelo termoplástico híbrido. Para lograr este objetivo, se diseña un molde en forma de placa y se implementa un horno compresor neumático automatizado mediante Software LabVIEW y Hardware Arduino, esto con el fin de controlar y estandarizar las temperaturas de fusión de las mezclas, la desgasificación y la fuerza de compresión.



Figura 1. Diseño del horno de compresión modelado en 3D Fuente: Autores, mediante Software Solidworks<sup>®</sup> 2017

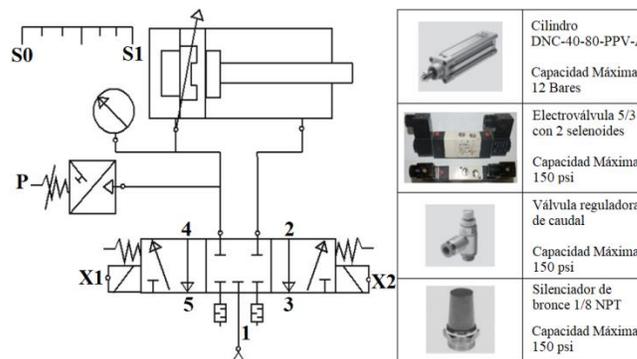


Figura 2. Esquema Neumático y especificación de elementos del sistema. Fuente: Autor, basado en referencia - Festo Fluidsim.

### 2.2.1 Diseño del horno y el sistema de compresión

En la formación de materiales poliméricos termoplásticos por compresión, el proceso debe contar con una fuente de calor generalmente por combustión, debido a las altas temperaturas de trabajo. Además, se requiere un molde, el cual debe tener la forma deseada del producto, en donde se coloca la carga de material a fundir y el sistema de compresión. En esta investigación se opta por un horno que utilice como fuente de calor gas propano. Por otro lado, se diseña un sistema neumático para la aplicación de la fuerza de compresión y basados en las dimensiones del equipo, se diseña el molde de trabajo.

Según lo anterior, se realiza la identificación de las necesidades técnicas, se toma de referencia el principio de modelamiento por compresión, debido a que en el proceso la materia prima debe alcanzar la temperatura de fusión, en ese momento, las resinas cambian de fase, presentándose como un líquido viscoso, por lo tanto, se maneja un fluido denso que en esencia es incompresible. El sistema debe ser capaz de desplazar el compuesto a través de las paredes del molde y eliminar los gases originados por condensación, controlando la presión aplicada. Seguidamente, se fija una temperatura de trabajo máxima de 300°C para los polímeros más comunes y se establece una presión de diseño máxima de 150 psia. A partir de estos datos, se elige un sistema neumático de potencia (Ver Fig. 1).

Para el sistema neumático, se utiliza un cilindro de doble efecto (Ver Fig. 2), controlando la fuerza de compresión por medio de una electroválvula con posición neutral.

### 2.2.2 Diseño del Molde de trabajo

El diseño del molde influye en la calidad del producto final, con la precisión de las piezas desarrolladas, allí se puede distinguir la necesidad de materiales con buenas propiedades mecánicas para soportar las fuerzas cortantes y presiones ejecutadas en el moldeo. Además, con el contacto directo entre el molde y la resina, es trascendental la capacidad de conducción térmica del material, siendo el acero Inoxidable AISI 304 ideal para estos casos por sus propiedades térmicas y mecánicas. El diseño debe poseer un método de extracción y desgasificación, puesto que, durante el proceso de polimerización, se pueden generar reacciones de condensación a altas temperaturas, produciendo vapores que generan imperfecciones, expansiones y fraccionamientos del polímero [20] (Ver Fig. 3).

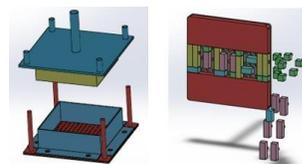


Figura 3. Diseño del molde de trabajo Fuente: Autores, mediante Software Solidworks<sup>®</sup> 2017

### 2.2.3 Diseño del circuito o sistema electrónico de control

La máquina compresora requiere de un sistema de control para operar automáticamente, este corresponde a una estructura de lazo cerrado para controlar constantemente las variables presentadas de temperatura y presión, en procura de fabricar las placas del polímero deseado, según se especifique

en el diseño de la mezcla (e.g PP + R-PET + CVSC), sin la intervención directa de un operario para manipular dicha máquina y estandarizando la programación. En la tabla I, se relacionan los elementos electrónicos y eléctricos implementados.

Cantidad	Elemento	Características
1	Sensor de temperatura	rango: 0 - 350 °C
1	Sensor de presión	rango: 0 - 150 psi
1	Arduino UNO	ADC 10bits, Volt 0 - 5 v
1	Módulo relé	4 canales, Pines digitales,
1	Electroválvula direccional	Val Neumática, 5 vías 3
1	Electroválvula	Válvula ON-Off
1	Chispa	Encendedor Eléctrico

Tabla I. Elementos electrónicos y eléctricos del montaje.

Fuente: Autores

### 2.2.4 Control y programación en LabView

Para el proceso de automatización, es necesario realizar una programación con el propósito de recibir, procesar y mostrar los datos recolectados por los sensores, a su vez esta información visualizarla en un terminal donde se pueda manipular, en este caso una computadora. El Grafcet establece el control de un proceso secuencial, llevado a cabo por etapas y transiciones [21]–[24]. Para realizar esto, se define lo que se va a controlar, se ordenan los componentes del proceso y se les da una nomenclatura como se puede observar en la tabla II y se diseña el diagrama Grafcet de programación mostrado en la Fig. 4.

Componentes y salidas	Descripción	Nomenclatura
Electroválvula 1	Electroválvula que da paso al gas propano hacia la estufa.	Q1
Solenoides 1	Electroválvula posición 1, encargado de dar paso al aire para bajar el embolo.	Q2
Solenoides 2	Electroválvula posición 3, encargado de dar paso al aire para subir el embolo del cilindro.	Q3
Electrodo	Electrodo encargado de generar la chispa, para encender la llama.	Q4
Sensor de temperatura N.C.	Sensor de temperatura normalmente cerrado.	S1
Sensor de presión N.A.	Sensor de presión normalmente abierto.	S2
Temporizador 1	Posición neutra durante 5 segundos.	T1
Temporizador 2	Tiempo de energización del electrodo, para primero dar tiempo de recorrido al gas propano en la estufa.	T2
Interruptor Manual	Activa e control manual de las 3 etapas.	S4

Tabla II Componentes para el diseño Grafcet

Fuente: Autores.

El sistema consiste en usar una arquitectura secuencial cíclica, donde se lean las variables de proceso y dicho sistema tome la decisión de conectar o desconectar las fuentes de temperatura y el instante de aplicación de la presión de inyección. La topología corresponde a un control en lazo cerrado, donde se mide la variable de respuesta y se compara con el Set Point de temperatura o de presión según el caso; la

acción corresponde a señales de salidas digitales ON-OFF. Luego, el sistema que recoge toda la información y realiza los cálculos se ejecuta mediante un microcontrolador Arduino UNO, integrado con una interfaz gráfica realizada en Software LabView. Este software permite leer señales, procesarlas y actuar en tiempo real. El lenguaje de programación de este compilador es en diagrama de bloques y permite además crear una interfaz interactiva de todo el proceso. Toda la programación se encuentra dentro de una estructura While Loop, con el fin de que sea continua la lectura de datos, dentro se encuentra una estructura “case” para tener una opción manual (False) y una secuencial autónoma (True).

El primer While Loop, es el que controla la temperatura del horno por medio de la apertura y cierre de una electroválvula, la cual abre y cierra el flujo de gas propano. Mediante una “fórmula note” descrita en lenguaje C++, se encuentra la transformación de voltaje a (sensor de presión) el valor de presión en Psi y MPa. Esta sección de código, permite comparar la temperatura del horno leída por el sensor y el “Set Point” de temperatura asignado. En el momento que la temperatura del horno es menor que el set, se abre la válvula de gas y enciende la chipa por 5 segundos. El segundo While Loop controla la presión que el pistón ejerce al plástico moldeado ya caliente. Después de llegar a la presión del “Set Point” se cierra la válvula direccional. El pistón permanece en esa posición durante un tiempo controlado para así permitir enfriar la probeta. Esta sección de código compara la presión del pistón (censada) con la presión del Set, cuando es mayor o igual la del pistón se cierra la válvula direccional. El tercer “While Loop” controla el sistema de liberación de molde, durante un tiempo de 3 segundos se acciona el solenoide 2 de la válvula direccional para así subir el pistón y liberal el molde.

Cada While Loop tiene un botón de parada de emergencia, con el fin de detener el proceso en cualquiera de las partes del proceso. El modo manual, permite controlar todos los elementos del horno por medio de interruptores booleanos dentro del programa. Son cuatro en total: Chispa, Válvula gas, Solenoide 1 válvula direccional (Bajar pistón), Solenoide 2 válvula direccional (Subir pistón).

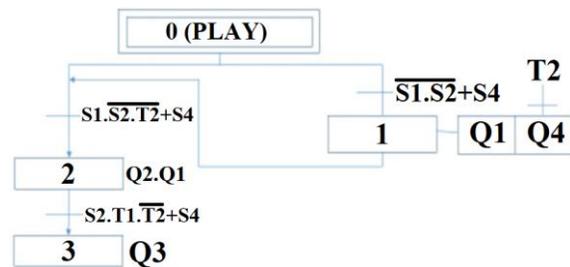


Figura 4. Diagrama Grafcet de programación.

Fuente: Autores

Terminada la programación en LabView, en la Fig. 5 se puede apreciar el aplicativo, donde se tiene el panel de control tanto manual como automático.

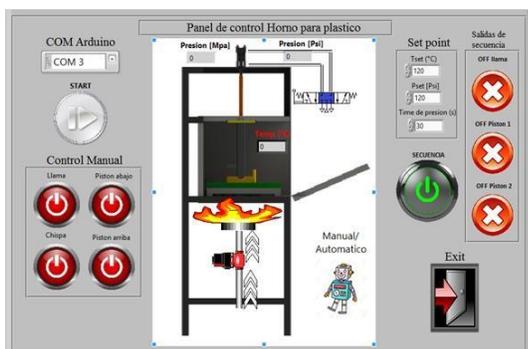


Figura 5. Aplicativo LabView  
Fuente: Autores

El equipo automatizado completo con todos los componentes se muestra en la Fig. 6.

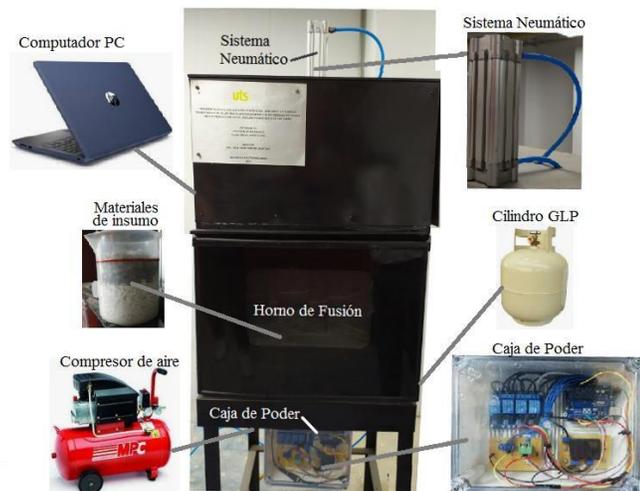


Figura 6. Equipo Automatizado con los componentes.  
Fuente: Autores.

### 2.2.5 Aplicación de pruebas experimentales

Se desarrollan diferentes diseños de mezclas entre resina de PP, escamas de R-PET y CVSC, siendo el PP el polímero matriz. Las placas obtenidas fueron fotografiadas a 48 MP (Megapíxeles), luego se realizaron cortes longitudinales y transversales, con el fin de ver la microestructura resultante; para esto, se usó un microscopio con un lente OLYMPUS MPlan N 10X/0.25/∞/-/FN22. Durante las pruebas se realizan diferentes combinaciones de mezclas en proporciones másicas de los tres (3) componentes señalados. En total se aplican 25 pruebas experimentales con diferentes temperaturas y presiones de fusión; seleccionando finalmente, dos modelos de mezclas diseñados que presentan las mejores propiedades mecánicas y biodegradabilidad. Además, homogeneidad de sus estructuras microscópicas y

macroscópicas, tabulando con plantillas, Modelo Termoplástico A y Modelo Termoplástico B.

**Modelo Termoplástico A:** Se diseñó una mezcla de 60% PP (180 g), 20% (60 g) de PET reciclado y 20% (60 g) de CVSC. Se estandarizó una temperatura de fusión de 220°C, alcanzada en un tiempo de 20 minutos, luego se activa una presión inicial para la desgasificación de 95 psi por un lapso de 10 segundos e inmediatamente se aumenta la presión hasta 120 psi. Finalmente se procede a un enfriamiento por convección forzada durante 10 minutos y se retira el modelo final del molde. Se observa que la placa obtenida tiene un aspecto externo de color grisáceo, la microestructura transversal muestra homogeneidad entre los componentes y las fibras longitudinales permiten observar la compactación de los elementos y la desgasificación en el proceso de compresión. Lo anterior, se resume en la Tabla III.

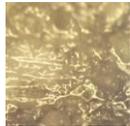
Relación de cantidades y porcentajes.	PP 180 g 60%	R-PET 60 g 20%	CVSC 60 g 20%
Temperatura Fusión	Presión de desgasificación		Presión final
220°C	95 psi		120 psi
Esesor de la placa	Largo x ancho		Tiempo de fusión
10.4 mm	200 mm x 200 mm		20 min
Tiempo para desgasificación		Tiempo de Enfriamiento	
10 seg.		10 min	
Análisis Macroscópico con fotografía de placa a 48 MP (Megapíxeles)	Análisis Microscópico con lente OLYMPUS MPlan N 10X/0.25/∞/-/FN22.		
	a) Fibras transversales	b) Fibras longitudinales	
			

Tabla III. Formato de prueba para el Modelo Termoplástico A  
Fuente: Autores.

Relación de cantidades y porcentajes.	PP 210 g 70%	R-PET 30 g 10%	CVSC 60 g 20%
Temperatura Fusión:	Presión de desgasificación:		Presión final:
220°C	90 psi		100 psi
Esesor de la placa:	Largo x ancho:		Tiempo de fusión:
9.8 mm	200 mm x 200 mm		16 min
Tiempo desgasificación		Tiempo de Enfriamiento	
10 seg.		10 min	
Análisis Macroscópico con fotografía de placa a 48 MP (Megapíxeles)	Análisis Microscópico con lente OLYMPUS MPlan N 10X/0.25/∞/-/FN22.		
	a) Fibras transversales	b) Fibras longitudinales	
			

Tabla IV. Formato de prueba para el Modelo Termoplástico B  
Fuente: Autores

**Modelo Termoplástico B:** Se procesó una mezcla de 70% PP (210 g), 10% (30 g) de PET reciclado y 20% (60 g) de CVSC. Programando una temperatura de fusión de 190°C en un tiempo de 16 minutos, posteriormente, se aplica una presión

para desgasificación de 90 psi por un lapso de 10 segundos e inmediatamente se aumenta hasta 100 psi. Luego, se deja enfriar por convección forzada durante 10 minutos y se retira el modelo final del molde. Se observa que la placa obtenida presenta pequeñas porosidades externas producidas durante la desgasificación, la microestructura transversal presenta nódulos asociados a las partículas de ceniza, pero con aspecto homogéneo y las fibras longitudinales permiten observar el acumulamiento de las partículas de cenizas CVSC y la cohesión del PP con el R-PET. Lo anterior, se resume en la Tabla IV.

### 3. Conclusiones

Se Diseñó e implementó una herramienta automática de prensado en un horno para la obtención de modelos termoplásticos, que opera en la plataforma computarizada LabView, a través de la arquitectura de Arduino, el producto final, se caracteriza porque es controlado en unos límites de presión y temperatura que son configurables en el aplicativo de un computador PC. Finalmente, y después de varios ensayos, son seleccionados Los Modelos A y B.

El R-PET debe mezclarse en pequeñas proporciones, pues, requiere mayor temperatura y tiempo de fusión, en el Modelo Termoplástico A, el comportamiento de este compuesto se logró estandarizar. Además, la morfología externa de la placa presenta un color homogéneo, la densidad disminuyó y las propiedades de biodegradabilidad aumentaron por la adición de CVSC que aporta  $C_aO$ , que a su vez absorbe  $CO_2$  del ambiente, produciendo condensación en la superficie de la placa.

### 4. Referencias

- [1] V. S. Ramachandran, R. M. Paroli, J. J. Beaudoin, and A. H. Delgado, "13- Introduction to Organic Construction Materials," V. S. Ramachandran, R. M. Paroli, J. J. Beaudoin, and A. H. B. T.-H. of T. A. of C. M. Delgado, Eds. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2002, pp. 531–577.
- [2] P. Franciszcak, E. Piesowicz, and K. Kalniņš, "Manufacturing and properties of r-PETG/PET fibre composite – Novel approach for recycling of PETG plastic scrap into engineering compound for injection moulding," *Compos. Part B Eng.*, vol. 154, pp. 430–438, 2018.
- [3] E. Elele *et al.*, "Mechanical properties of polymeric microfiltration membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 591, p. 117351, 2019.
- [4] J. D. Martínez, R. A. Villamizar, and O. O. Ortíz, "Pod Husk As a Renewable Energy Source," *Agrociencia*, 2015.
- [5] F. Lu *et al.*, "Valorisation strategies for cocoa pod husk and its fractions," *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 14, no. July, pp. 80–88, 2018.
- [6] S. F. Dina, H. Ambarita, F. H. Napitupulu, and H. Kawai, "Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 5, pp. 32–40, 2015.
- [7] T. A. Yassen and H. H. Al-kayiem, "Experimental investigation and evaluation of hybrid solar/thermal dryer combined with supplementary recovery dryer," *Sol. Energy*, vol. 134, pp. 284–293, 2016.
- [8] K. P. P. Nair, "5 Cocoa (Theobroma cacao L.)," 2010.
- [9] Z. S. Vásquez *et al.*, "Biotechnological approaches for cocoa waste management : A review," vol. 90, pp. 72–83, 2019.
- [10] A. Rudin and P. Choi, "Chapter 5 - Polymer Mixtures," A. Rudin and P. B. T.-T. E. of P. S. & E. (Third E. Choi, Eds. Boston: Academic

Press, 2013, pp. 231–274.

- [11] A. Rudin and P. Choi, "Chapter 4 - Mechanical Properties of Polymer Solids and Liquids," A. Rudin and P. B. T.-T. E. of P. S. & E. (Third E. Choi, Eds. Boston: Academic Press, 2013, pp. 149–229.
- [12] J. Maris, S. Bourdon, J. Brossard, L. Cauret, L. Fontaine, and V. Montebault, "Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 147, no. November 2017, pp. 245–266, 2018.
- [13] M. C. Forte and F. M. B. Coutinho, "The influence of catalyst system and polymerization conditions on polypropylene properties," *Eur. Polym. J.*, vol. 32, no. 5, pp. 605–611, 1996.
- [14] A. Ishikawa, T. Sakai, and K. Fujii, "An ionic liquid gel with ultralow concentrations of tetra-arm polymers: Gelation kinetics and mechanical and ion-conducting properties," *Polymer (Guildf.)*, vol. 166, pp. 38–43, 2019.
- [15] F. Fraternali, I. Farina, C. Polzone, E. Pagliuca, and L. Feo, "On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars," *Compos. Part B Eng.*, vol. 46, pp. 207–210, 2013.
- [16] N. A. Rorrer, S. Nicholson, A. Carpenter, M. J. Bidy, N. J. Grundl, and G. T. Beckham, "Combining Reclaimed PET with Bio-based Monomers Enables Plastics Upcycling," *Joule*, vol. 3, no. 4, pp. 1006–1027, 2019.
- [17] R. C. Nonato and B. C. Bonse, "A study of PP/PET composites: Factorial design, mechanical and thermal properties," *Polym. Test.*, vol. 56, pp. 167–173, 2016.
- [18] A. Valencia-Pinzón, "El 38% del cacao en el país (Colombia) sale de Santander," *Periodico Vanguardia*, vol. Economía, 2018.
- [19] G. Padrón-gamboa *et al.*, "Efecto de la cáscara de cacao en la obtención de espumas de poliuretano para uso hortícola. Propiedades físicas y de biodegradabilidad," *Rev. la Soc. Química México*, vol. 48, no. 002, pp. 156–164, 2004.
- [20] B. G. Mwanza and C. Mbohwa, "Drivers to Sustainable Plastic Solid Waste Recycling: A Review," *Procedia Manuf.*, vol. 8, no. October 2016, pp. 649–656, 2017.
- [21] A. Sánchez-Alvarez, D. Luna-Moreno, J. A. Hernández-Morales, J. O. Zaragoza-Zambrano, and D. H. Castillo-Guerrero, "Control of Stepper Motor Rotary Stages applied to optical sensing technique using LabView," *Optik (Stuttg.)*, vol. 164, pp. 65–71, 2018.
- [22] Y. Zhang, Y. Li, X. Gu, H. Liu, Y. Zhang, and W. Hu, "Laser spot image acquisition and processing based on LabVIEW," *Optik (Stuttg.)*, vol. 185, no. November 2018, pp. 505–509, 2019.
- [23] M. Hamel and H. Mohellebi, "A LabVIEW-based real-time acquisition system for crack detection in conductive materials," *Math. Comput. Simul.*, 2018.
- [24] P. Ponce, H. Ponce, A. Molina, and B. MacCleery, "Soft Computing Based On LabVIEW," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, no. 9, pp. 975–981, 2013.

### 5. Biografías

**Arly Darío Rincón Quintero**, Doctor (Curso) en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Magister en Eficiencia Energética (UPV/EHU), Docente de carrera en las Unidades Tecnológicas de Santander UTS e investigador asociado ante COLCIENCIAS.

**Alexander Meneses Jácome**, Doctor en Ingeniería (ITESM), Doctor en Ingeniería de Sistemas Energéticos (UNAL), Docente de carrera en las Unidades Tecnológicas de Santander UTS.

**Luis Alfonso del Portillo Valdés**, Doctor en Ingeniería Energética y Fluidomecánica por la Universidad de Valladolid, Profesor titular del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos en la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU).

**Johan Fabián Santander Rivera, Jainer Enrique Lizcano Espinel y Sergio Mauricio Amado Morales**, estudiantes de Ingeniería Electromecánica de las UTS e investigadores en Formación.

# Sistema de control gestual para aplicación en robótica

Arnoldo Fernández Ramírez, Alberto Daniel Echeverría Pérez, Roxana García Andrade<sup>1</sup>,  
Armando Martínez Reyes<sup>1</sup>, Ernesto Rincón Martínez

*División de Estudios de Posgrado e Investigación*

<sup>1</sup> *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico De Nuevo León*

*Av. Eloy Cavazos # 2001 Colonia Toluca, C.P. 67170,*

*Guadalupe, Nuevo León*

*Tel: (81) 23-82-11-04*

*daniel.echeverria69@gmail.com*

**Resumen-** La robótica es en la actualidad un campo de investigación muy amplio y de gran importancia para impulsar el desarrollo tecnológico debido a sus numerosas aplicaciones en áreas como la industria, medicina, investigación, búsqueda y rescate de personas, exploración del lecho marino y el espacio, limpieza de residuos tóxicos y más.

Se propone un método para imitar los movimientos físicos de un humano utilizando Kinect 1.0 desarrollado por Microsoft, planteando el uso de un sistema que permite gestionar la posición y orientación de un robot de manera remota con movimientos de las manos. De esta forma será posible generar una interfaz gráfica de usuario e interactuar con el robot donde se mueva con alguna extremidad del cuerpo en este caso la mano.

*Palabras clave: Kinect, control gestual, robot, interacción.*

**Abstract-** Robotics is currently a very broad and important field of research to drive technological development due to its numerous applications in areas such as industry, medicine, research, search and rescue of people, exploration of the seabed and space, cleaning toxic waste and more.

A method is proposed to imitate the physical movements of a human using Kinect 1.0 developed by Microsoft, proposing the use of a system that allows to manage the position and orientation of a robot remotely with hand movements. In this way it will be possible to generate a graphical user interface and interact with the robot where it moves with any limb of the body in this case the hand.

*Keywords: Kinect, gesture control, robot, interaction.*

## 1. Introducción

El avance de la tecnología en los últimos años trae consigo innovación y nuevas alternativas a la hora de interactuar con aplicaciones. Cada vez más se tiende a que el usuario interactúe con los dispositivos a través de su propio espacio, esto es, usando sus manos, sus gestos faciales, etc. Ahora es posible, mediante la utilización de diversos dispositivos sensores, captar posiciones estáticas y control gestual, y traducirlos en acciones de utilidad, otorgando nuevas posibilidades de aplicaciones que hagan uso de esta novedosa forma de interacción. El dispositivo Microsoft Kinect for Windows y similares, han introducido en el mundo del PC una nueva forma de interacción denominada “Touchless Gesture User Interface” o TGUI (Interfaz de Usuario por Gestos sin Contacto). Se trata de una tecnología novedosa en proceso de evolución. El fuerte interés surgido en éste área trajo consigo mejoras y evolución en cuanto a la calidad de sensores, rango de alcance y apertura, velocidad de procesamiento y capacidad, obteniendo cada vez un mejor rendimiento y una mayor precisión de lo captado. La industria del hardware provee una serie de dispositivos capaces

de capturar el movimiento. Dentro de la gama de dispositivos reconocedores podemos encontrar al Kinect.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes

Las comunicaciones de información entre personas y máquinas, la interacción hombre-máquina están en continuo desarrollo, pero la interacción hombre-máquina sigue estando limitada por la necesidad de utilizar ciertos equipos físicos para activar el comando, y gradualmente no puede satisfacer la complejidad de muchas ocasiones. Por lo tanto, para cumplir con los requisitos inteligentes en el proceso interactivo, el reconocimiento de gestos se ha convertido en un tema de investigación candente en el campo de las aplicaciones informáticas.[1].

Comparando con las otras partes del cuerpo, la mano es una de las maneras más convenientes y naturales de expresar nuestros sentimientos, por lo que la investigación del reconocimiento gestual de la mano, ha sido un importante objetivo en los años recientes. Hoy en día, las aplicaciones interactivas de gráficos con control gestual han ganado un alto perfil y una mejora en la que las personas interactúan con las computadoras[2].

Desde que fueron liberadas las diferentes librerías de programación para el sensor Kinect es una computadora personal, el sensor ha sido utilizado en robots de uno medico e industrial[3][4].

## 3. Metodología

### A. Arduino.

Arduino Fig. 1 es una plataforma de creación de prototipos de electrónica de Código abierto compuesta por un microcontrolador, un lenguaje de programación y un IDE[5]. Arduino es una herramienta para crear aplicaciones interactivas, diseñada para simplificar esta tarea para principiantes, pero a la vez es lo suficientemente flexible como para que los expertos desarrollen proyectos complejos[6].



Fig.1 Arduino UNO

Lo primero que debe hacer si desea trabajar con Arduino es comprar una placa Arduino y un cable USB estándar (conector A B si está usando un Arduino Uno). Entrar al sitio web del software Arduino en <http://arduino.cc/en/Main/Software> y descargue la versión del software compatible con su sistema[7].

### 3.1 Instalación en Windows

Primero, descargue el archivo (.zip) de Windows y descomprímalo. Verás una carpeta llamada arduino-1.0. Esta es su carpeta Arduino y debe almacenarla en algún lugar de la computadora desde donde pueda ejecutar el programa más adelante. La carpeta Archivos de programa parecería un lugar razonable para el software Arduino, pero puede elegir una ubicación alternativa.[8]

Debe instalar los controladores Arduino antes de poder comenzar a trabajar con su placa.

Suponiendo que está instalando un Arduino Uno, siga estos pasos:

- Conecte su tarjeta a su computadora y espere a que Windows inicie el proceso de instalación del controlador. Después de un tiempo, fallará. No hay problema.
- Haga clic en el menú Inicio y abra el Panel de control.
- Vaya a Sistema y seguridad, luego Sistema y luego Administrador de dispositivos.
- Busque el puerto Arduino Uno que figura en Puertos (COM y LPT).
- Haga clic derecho en él y seleccione "Actualizar software de controlador", seleccionando "Buscar en mi computadora el software de controlador".
- Finalmente, navegue y seleccione el archivo del controlador de Arduino Uno llamado ArduinoUNO.inf ubicado en la carpeta Controladores de la carpeta del software Arduino que acaba de descargar. Windows instalará con éxito la placa ahora.

### B. Kinect.

El Kinect Fig.2 se lanzó el 4 de noviembre de 2010 y vendió 8 millones de unidades en los primeros 60 días, ingresando a los *Records Mundiales Guinness* como el "dispositivo electrónico de consumo más vendido en la historia". el primer dispositivo sensor comercial que permite al usuario interactuar con una consola a través de una interfaz de usuario natural (mediante gestos y comandos hablados en lugar de un controlador de juegos)[4].



Fig.2 Kinect 1.0

Actualmente hay dos tipos de sensor Kinect.

- Kinect 1.0
- Kinect 2.0

Si usted compra el Kinect 1.0, también necesitará comprar una fuente de alimentación separada, el USB de su computadora no puede entregar la cantidad de corriente necesaria para el sensor, y el USB especial de Kinect no cabe en su puerto USB estándar. Necesitará la fuente de alimentación de CA para conectar su Kinect a un tomacorriente, y para convertir el enchufe USB especial a un USB estándar que podrá conectar a su computadora Fig.3.



Fig.3 Fuente de alimentación

El sensor Kinect cuenta con una cámara RGB, un sensor de profundidad que consiste en un proyector láser infrarrojo y un sensor CMOS infrarrojo, y un micrófono multi-array que permite la localización de la fuente acústica y la supresión del ruido ambiental. También contiene una luz LED, un acelerómetro de tres ejes y un pequeño servo que controla la inclinación del dispositivo.

La cámara RGB es una cámara con resolución VGA de 8 bits (640 x 480 píxeles). Puede que esto no suene muy impresionante, pero debe recordar que la magia ocurre en el sensor de profundidad, que es completamente independiente de la cámara RGB[9].

Los dos elementos del sensor de profundidad, el proyector IR y la cámara IR, trabajan conjuntamente con el chip interno de PrimeSense para reconstituir una captura de movimiento en 3D de la escena frente al Kinect. Lo hacen utilizando una técnica llamada escaneo 3D con luz estructurada. La cámara IR también utiliza una resolución VGA (640 x 480 píxeles) con una profundidad de 11 bits, lo que proporciona 2,048 niveles de sensibilidad. La Fig. 4 se muestra la ubicación de los componentes del Kinect 1.0



Fig.4 Componentes de Kinect 1.0

El rango práctico de Kinect va de 1.2 a 3.5 m. Si los objetos están demasiado cerca del sensor, no se escanearán y solo aparecerán como puntos negros; si están demasiado lejos, la precisión de escaneo será demasiado baja, haciéndolos aparecer como objetos planos. Si está utilizando el dispositivo Kinect para Windows, el alcance de la cámara es más corto, de 40 cm a 3 m.

### 3.2 Capacidades del Kinect.

¿Qué puedes hacer con tu dispositivo Kinect y todas las cosas de alta tecnología escondidas en el interior? Una vez que Kinect esté correctamente instalado y se comunique con su computadora, podrá acceder a una serie de flujos de datos en bruto y otras capacidades proporcionadas por un middleware específico.

#### Imagen RGB

Puedes usar el Kinect como una cámara web de 640 x 480 píxeles.

#### Imagen IR

Como Kinect tiene un CMOS infrarrojo, también puede acceder a la imagen IR de 640 x 480 con OpenNI.

#### Mapa de profundidad

El mapa de profundidad es el resultado de las operaciones realizadas por el chip PS1080 de PrimeSense en la imagen IR capturada por IR CMOS de Kinect. Esta imagen VGA tiene una precisión de 11 bits, o 2048 valores diferentes, representados gráficamente por niveles de gris de blanco (2048) a negro (0).

#### Seguimiento de mano y esqueleto

Una vez que se ha generado el mapa de profundidad, puede usarlo directamente para sus aplicaciones o ejecutarlo a través de un middleware específico para extraer información más compleja del mapa de profundidad en bruto[10].

### C. OpenNI and NITE

Se utilizó OpenNI y NITE para acceder a los flujos de datos de Kinect y las capacidades de seguimiento de mano / esqueleto. La compañía israelí PrimeSense desarrolló la tecnología detrás de las imágenes 3D de Kinect y trabajó con Microsoft en el desarrollo del dispositivo Kinect. En diciembre de 2010, PrimeSense creó una organización sin fines de lucro dirigida por la industria llamada OpenNI, que significa interacción natural abierta.

Esta organización se formó para "certificar y promover la compatibilidad e interoperabilidad de dispositivos, aplicaciones y middleware de interacción natural (NI)". Los miembros fundadores de la organización OpenNI son PrimeSense, Willow Garage, Side-Kick, ASUS y AppSide [10].

### 3.3 OpenNI

Para cumplir su objetivo, OpenNI lanzó un marco de código abierto denominado OpenNI Framework. Proporciona una API y un middleware de alto nivel llamado NITE para implementar el rastreo de mano / esqueleto y el reconocimiento de gestos[11].

En la Fig.5 se visualiza las tres capas que representan los componentes de OpenNI[12]:

- Capa superior: Representa el software que implementa la aplicación de Interacción Natural sobre OpenNI.
- Capa del medio: Representa a OpenNI, otorgando una interfaz de comunicación que interactúa entre los sensores y los componentes middleware, que analizan los datos del sensor.
- Capa inferior: Representa los aparatos hardware que capturan la información visual y auditiva de la escena.

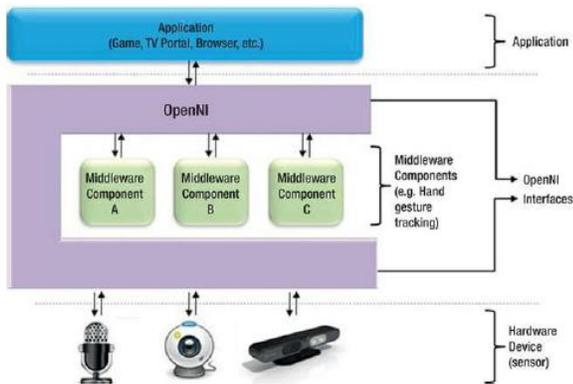


Fig.5 Esquema de Capas sobre los componentes de OpenNI[12].

PrimeSense luego vende su tecnología a fabricantes como ASUS y otros fabricantes de computadoras o televisores. Pero para que este mercado se desarrolle, es necesario que exista un ecosistema de personas que creen contenido y aplicaciones basadas en la interacción natural. PrimeSense creó OpenNI como una forma de capacitar a los desarrolladores para agregar interacción natural a su software y aplicaciones para que este ecosistema florezca [10][13].

### 3.4 NITE

Para que se implemente una interacción natural, el desarrollador necesita más que la nube de puntos 3D de Kinect. Las características más útiles provienen de las capacidades de rastreo de mano y esqueleto. No todos los desarrolladores tienen el conocimiento, el tiempo o los recursos para desarrollar estas capacidades desde cero, ya que implican algoritmos avanzados. PrimeSense decidió implementar estas capacidades y distribuir las con fines comerciales, pero mantuvo el código cerrado y, por lo tanto, se desarrolló NITE[14][10].

Hay mucha confusión sobre las diferencias entre OpenNI y NITE. OpenNI es el marco de PrimeSense; le permite adquirir la profundidad y las imágenes RGB del Kinect. OpenNI es de código abierto y para uso comercial. NITE es el middleware que le permite realizar un seguimiento de mano / esqueleto y reconocimiento de gestos. NITE no es de código abierto, pero también se distribuye para uso comercial.

Esto significa que sin NITE no puede usar el seguimiento de esqueleto / mano o el reconocimiento de gestos, a menos que desarrolle su propio software intermedio que procesa los datos de la nube de puntos de OpenNI y extrae la información de la unión y los gestos[10].

### 3.5 Alternativa a Kinect: ASUS Xtion PRO

En 2012, ASUS reveló el Xtion PRO Fig.6 una implementación exacta del diseño de referencia de PrimeSense que solo presenta una cámara de profundidad. Fue seguido por el Xtion PRO LIVE que, como Kinect, incluye una cámara RGB y la cámara infrarroja[13][15].



Fig.6 ASUS XtionPro

### D. Processing

En este proyecto se utilizó Kinect y Arduino, y una de las formas más directas de interactuar con ellos es a través de Processing, un lenguaje de programación de código abierto basado en Java[16].

Una de las mejores características de Processing es que, al construirse en Java, existe una gran comunidad de personas que crean bibliotecas de Processing que puede utilizar para sus proyectos. Kinect no es una excepción y, por lo tanto, Processing puede comunicarse con los dispositivos de Kinect a través de varias bibliotecas disponibles en su sitio web. El procesamiento también es capaz de comunicarse con Arduino mediante la comunicación en serie. técnicas es esencial para el desarrollo de cualquiera de los próximos proyectos[17].

### E. OpenCV y Python

OpenCV es una biblioteca de código abierto y multiplataforma que proporciona bloques de construcción para experimentos y aplicaciones de visión artificial. Proporciona interfaces de alto nivel para capturar, procesar y presentar datos de imágenes. OpenCV es ampliamente utilizado tanto en el mundo académico como en la industria. Hoy en día, la visión artificial puede llegar a los consumidores en muchos contextos a través de cámaras web, teléfonos con cámara y sensores de juegos como el Kinect. Para bien o para mal, a la gente le encanta estar frente a la cámara, y como desarrolladores, nos enfrentamos a una demanda de aplicaciones que capturan imágenes, cambian su apariencia y extraen información de ellas[18].

### 4. Desarrollo

Para el Desarrollo de este proyecto fueron necesarios los siguientes frameworks y librerías gratuitas:

- OpenCV 2.4.9
- Python 2.7
- NumPy 1.9.2
- wxPython 2.8

- SciPy 0.16.0
- matplotlib 1.4.3
- libfreenect 0.5.2
- NITE
- Open NI

Lo primero que tienes que hacer es instalar todas las librerías, se recomienda que se trabaje sobre Windows 7 si estas utilizando el Kinect 1.0 y se tu optaste por utilizar el Kinect 2.0 o v2 te recomiendo que utilices Windows 10 y un pc que cuente con un puerto USB 3.0 para que no tengas problemas de latencia, de igual forma insisto que se utilice Windows 7 ya que las librerías necesarias para que el Kinect funcione correctamente tienen mejor soporte en esta versión del S.O

La primera actividad que se realizó con el Kinect fue el seguimiento de las manos, debido a nuestro uso tan hábil de nuestros miembros superiores, el seguimiento manual es una característica muy útil para la interacción natural. Podemos posicionar nuestras manos con mucha precisión en el espacio, y podemos realizar una gran cantidad de gestos con ellas. Estas habilidades se pueden usar para controlar parámetros o desencadenar comportamientos diferentes en sus aplicaciones de interacción natural. Todo esto es posible gracias a la librería OpenNI / NITE. Esta es una gran característica que no existe en el SDK oficial de Microsoft, al menos en la versión beta.

Existen diversos métodos en esta librería que podemos usar, a continuación, alguno de ellos y una breve definición de cómo utilizarlos. El método *onCreateHands ()* Fig.7 se llama cuando se detecta una mano y se inicializa un objeto de mano. Obtiene un entero que contiene la ID de la mano, un PVector que define su posición en el reconocimiento y un valor flotante.

```
void onCreateHands (int handId, PVector pos, float time) { }
```

Fig.7 Función onCreateHands

La función *onUpdateHands ()* Fig.8 se llama cada vez que Kinect actualiza los datos de la mano. Obtiene un nuevo vector de posición y tiempo para la mano.

```
void onUpdateHands (int handId, PVector pos, float time) { }
```

Fig.8 Función onUpdateHands ()

Cuando se destruye una mano (cuando desaparece de la pantalla o ya no es reconocible), se invocará la función *onDestroyHands ()* Fig.9.

```
void onDestroyHands (int handId, float time) { }
```

Fig.9 Función onDestroyHands ()

La función *onRecognizeGesture ()* Fig.10 se llama cuando NITE reconoce un gesto. La cadena *strGesture* contiene el nombre del gesto reconocido (Wave, Click o RaiseHand). También obtiene las posiciones inicial y final del gesto en dos PVectors tridimensionales.

```
void onRecognizeGesture (String strGesture, PVector idPosition, PVector endPosition) { }
```

Fig.10 Función onRecognizeGesture ()

La función *onProgressGesture ()* Fig.11 se activa mientras el gesto está en progreso, pero antes de que se haya reconocido. Le da el porcentaje de finalización del gesto, junto con el tipo de gesto y la posición actual de la mano. Esto suele ser un período de tiempo muy corto, pero puede ser útil para algunas aplicaciones.

```
void onProgressGesture (String strGesture, PVector position, float progress) { }
```

Fig.11 Función onProgressGesture ()

El Código tiene que estar montado en la tarjeta Arduino para poder recibir datos mediante el monitor serial. El código hace lo siguiente:

1. Verifica que haya datos disponibles en el puerto serial.
2. Lee el primer valor y se inicia la lectura del puerto serial.
3. Si el valor es el carácter que dispara el evento 'S'.
4. Lee el valor, el cual es x-value.
5. Luego lee el siguiente valor y-value.
6. Manda esos datos a los leds.

Ahora tenemos el código para que nuestro Kinect 1.0 pueda controlar los servomotores dependiendo de la posición de la mano, este código se tiene que implementar en IDE de processing 1.x.x. El código hace lo siguiente:

1. Defines las variables que tendrán la posición de tu mano *PVector handVec*, *mapHandVec* y *color handPointCol*.
2. Habilita *depthMap*: *kinect.enableDepth*, *enableGesture*, *enableHands*
3. Añadir gesto de enfoque para iniciar el seguimiento: *kinect.addGesture*.
4. Envía un dato para indicar el inicio *myPort.write('S')*.
5. Envía los datos del mouse X y mouse Y.

En el código da la posición en los 3 ejes

1. Agregamos las librerías siguientes: `import SimpleOpenNI`, `import processing.serial`, `import cc.arduino` y `Arduino arduino`;
2. Definimos nuestras salidas de los servomotores que representan nuestros tres ejes X, Y y Z. Continuamos definiendo los valores nuestros tres ejes.
3. Con la función `kinect.enableUser`. activa el seguimiento de usuarios.
4. usamos la función `new IntVector()` se hace un vector de entradas para almacenar la lista de usuarios.
5. Se escribir la lista de usuarios detectados en nuestro vector con `kinect.getUsers(userList)`.
6. Detecta al usuario para después detectar el vector de la mano derecha e izquierda para después almacenar los vectores.
7. Convierte la posición de la mano detectada en coordenadas "proyectivas" que coincidan con la imagen de profundidad.
8. Envía los datos a los servomotores.

## 5. Validación y Pruebas

El sujeto se posiciona frente el sensor de movimiento *Kinect 1.0*. Se encenderán los leds X y Y cuando el sujeto se encuentre en posición de firme y se encuentre en el campo de visión del dispositivo una vez hecho esto el sujeto empiece a realiza los primeros movimientos, mandar gestos que por medio de un algoritmo el dispositivo reconoce: arriba, abajo, izquierda, derecha. Empezando a mandar señales a la placa de programación Arduino obteniendo la posición X y Y los leds deben realizar el encendido respecto a X y Y, ver fig.13.



Fig.13 Detección de los ejes X, Y y Z.

## 6. Conclusiones

La robótica es en la actualidad un campo de investigación muy amplio y de gran importancia para impulsar el desarrollo

tecnológico debido a la novedosa interacción robusta entre el ordenador y el ser humano utilizando gestos corporales.

Para su uso en la industria al requerir una mayor precisión en el manejo de los productos en distintos procesos, también se abre la posibilidad de utilizar las simulaciones con fines académicos, para practicas pre-proceso.

En conclusión, se puede lograr la realización de aplicaciones intuitivas, que puedan lograr generar una interacción de tele-presencia entre receptor y emisor empleando cualquier tipo de protocolo multimedia.

El trabajo futuro abordará la calibración conjunta de dos dispositivos de movimiento con el fin de calcular nuevas características basadas en la combinación de las posiciones 3D. Este trabajo ha sido desarrollado con financiamiento del consejo nacional de ciencia y tecnología, CONACYT en el Tecnológico Nacional de México / Tecnológico de Nuevo León.

## 7. Referencias

- [1] S. Song, D. Yan, and Y. Xie, "Design of control system based on hand gesture recognition," ICNSC 2018 - 15th IEEE Int. Conf. Networking, Sens. Control, no. 16, p. 1, 2018.
- [2] A. Yennam, K. Sherwani, and N. Kumar, "Development of kinematic measurement system with Kinect sensor," 12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015, pp. 1-5, 2016.
- [3] F. Javier and V. Vázquez, "Brazo Robótico Controlado Mediante Sensor Kinect," 2013.
- [4] A. S. Sabale, "Accuracy Measurement of Depth Using Kinect Sensor," p. 155, 2016.
- [5] A. M. Gibb, A. Gibb, E. Skiff, and C. Thompson, "NEW MEDIA ART , DESIGN , AND THE ARDUINO MICROCONTROLLER : A MALLEABLE TOOL by," no. February, p. 8, 2010.
- [6] B. Massimo, "Arduino - About Us," 2019. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>.
- [7] S. F. Barrett, Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Third Edition, Third Edit. 2013.
- [8] R. E. Herrador, "Guía de Usuario de Arduino," p. 16,17,27,29, 2009.
- [9] J. Suarez and R. R. Murphy, "Hand Gesture Recognition with Depth Images : A Review," p. 412, 2012.
- [10] Soroush Falahati, "OpenNI Cookbook," 2013, p. 11,15,18,24.
- [11] C. Bellmore, R. Ptucha, and A. Savakis, "INTERACTIVE DISPLAY USING DEPTH AND RGB SENSORS FOR FACE AND GESTURE CONTROL."
- [12] O. L. Contreras, "Motion capture amb Microsoft Kinect," 2012.
- [13] ASUS, "Xtion PRO Sensor 3D ASUS Global," 2019. [Online]. Available: [https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion\\_PRO/](https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion_PRO/).
- [14] G. Devices and P. Sense, Prime Sensor TM NITE 1 . 3 Controls Programmer ' s Guide. 2010.
- [15] A. S. Kundu, O. Mazumder, A. Dhar, and S. Bhaumik, "Occupancy Grid Map Generation using 360 ° Scanning Xtion Pro Live for Indoor Mobile Robot Navigation," no. Cmi, p. 465, 2016.
- [16] B. Fry, "Processing," 2019. [Online]. Available: <https://processing.org/>.
- [17] D. Shiffman, "Comenzando con Kinect y Procesando \_," 2019. [Online]. Available: <https://shiffman.net/p5/kinect/>.
- [18] G. Bradski and A. Kaehler, Learning OpenCV, Computer Vision with OpenCV Library. 2008.

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE SISTEMA ROBÓTICO PARA MANIPULACIÓN UTILIZANDO ANIMACIÓN POR COMPUTADOR

Arnoldo Fernández Ramírez<sup>a</sup>, Macías Solís José Francisco<sup>b</sup>, Alberto Daniel Echeverría Pérez, Roxana García Andrade<sup>1</sup>,  
Armando Martínez Reyes<sup>1</sup>, C. Hernández-Santos,

<sup>1</sup> División de estudios de Posgrado, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico De Nuevo León  
Av. Eloy Cavazos #2001 Colonia Tolteca, C.P. 67170, Guadalupe, Nuevo León, Tel: (81) 81-57-05-00

<sup>a</sup>arnoldo\_28@hotmail.com, <sup>b</sup>macias.itnl@gmail.com

**Resumen**—Una de las principales limitaciones que presentan los manipuladores robóticos industriales está directamente relacionada con el uso de múltiples efectores finales, los cuales se deben intercambiar para poder ejecutar diferentes tareas. Por lo anterior, el presente trabajo expone el desarrollo de un prototipo de bloque terminal, tipo mano robótica antropomórfica, la cual puede ser implementado como efector final genérico en tareas de manipulación. Se propone una simulación y una interfaz gráfica. El Prototipo diseñado permite manipular diferentes volúmenes geométricos, imitando en sus movimientos básicos a la mano humana. Se ha planteado también que este prototipo en etapas más avanzadas pueda ser utilizado como efector final, también pueda tener aplicaciones como prótesis para personas con algún tipo de amputaciones en la parte final de las extremidades superiores.

*Palabras clave.* Prótesis, diseño, sistema robótico, mano, simulación.

## 1. Introducción

La animación por ordenador y la robótica tienen muchos de sus fundamentos matemáticos en común. Por lo tanto, Blender es un candidato de GUI (graphical user interface) natural (pero aún no expuesto) para la simulación y programación de robots.

La comunidad de científica en robótica carece de una herramienta gráfica avanzada como Blender, pero, por otro lado, tiene algoritmos más avanzados y eficientes que Blender para la simulación físicamente realista de armaduras. Por ejemplo, la cinemática inversa de estructuras humanoides, teniendo en cuenta su dinámica, y con un enfoque genérico para la generación automática de movimientos naturales. En este documento se presenta el uso de Blender junto con su poderoso motor de físicas para la simulación y prototipado real de sistemas robóticos, por otro lado, el control de las manos de múltiples manos para las habilidades de manipulación finas es extremadamente difícil, debido a la compleja dinámica de la mano, los desafíos de la manipulación no prensil y la sub-actuación. Además, el diseño mecánico de las manos de múltiples dedos tiende a ser

complejo y delicado. Aunque en el pasado [2] se han propuesto varios diseños de manos diferentes, muchas de estas manos son caras y frágiles.

En este artículo, también tomamos una orientación al cómo la mano robótica antropomórfica puede diseñarse de manera tal que la fabricación de la mano robótica sea rápida, el costo de la modificación y el mantenimiento sean baratos, y el control de la mano robótica sea factible presentando el diseño y actuación.

## 2. Metodología y diseño

El principal objetivo de este trabajo es diseñar y simular en una herramienta no muy utilizada en este medio pero que nos puede entregar muchos beneficios como lo sería el ahorro en los costos de modificación, mantenimientos y la posibilidad de generar archivos que posteriormente sean utilizados en un prototipado más rápido haciendo uso de la tecnología de impresión 3d, pero antes de lograr un prototipo de mano robótica que pueda realizar agarres y manipulación de objetos. Se propone alcanzar los siguientes objetivos: [3]

- Análisis del diseño previo.

-Re-diseño mecánico de la mano robótica en un software de diseño asistido por computador CAD (SolidWorks 2018), teniendo en cuenta las medidas antropométricas promedio de una mano humana, la funcionalidad, los costos, mantenimiento, modularidad y flexibilidad.

- Simulación del diseño propuesto, que permita validar la mecánica, el software y hardware del diseño del prototipo.

-Re-diseño de la parte final de la falange distal del dedo robótico

## A. Blender

La robótica y la animación por computadora tienen en común gran parte de sus antecedentes matemáticos: especificación y visualización de movimiento en 3D; Cinemática de avance e inversa de las "armaduras". interacción con el "mundo exterior" a través de sensores y actuadores; existen algunas herramientas comerciales de programación y visualización, pero son caras y tienen un alto grado de bloqueo; existen algunos otros programas de código abierto, pero faltan uno o más de los componentes principales. Blender parece ser, a largo plazo, una combinación perfecta para todas las necesidades de robótica. Las capacidades con las que cuenta y que nos hace pensar que será una dupla perfecta son: [4]

- Tiene un diseño elemental muy bueno, aparte de una valiosa integración con el lenguaje de programación Python
- Contiene la mayoría de las estructuras de datos básicas y bibliotecas para robótica. In casu, moto y iksolver.
- Contiene un buen soporte para la representación del movimiento simulado, incluida la generación de videos.
- Es rápido.
- Es personalizable y flexible.
- La "competencia" en el dominio de la robótica es muy inmadura.

Pero como toda herramienta no es perfecta y tiene sus desventajas aquí alguna de ellas:

- La interfaz de Blender es demasiado difícil para los investigadores en el área de robótica.
- La robótica tiene múltiples familias de IPO para la generación automática de trayectorias, es decir, no solo la interpolación entre fotogramas clave.
- Para una simulación realista se tendrá que programar en Python.

## B. Modelo Cinemático y restricciones

Las curvas de interpolación (OPI) se utilizan para controlar la variación de los atributos de los elementos de las armaduras a lo largo del tiempo. En Blender se le conocen como curvas de animación que, a partir de los valores que toman en los puntos de control (frames clave), interpolan los valores del parámetro en los frames intermedios, en Blender se "sintonizan" a través de fotogramas clave: el programador define algunos puntos por los que debe pasar una armadura y

utiliza curvas de tipo spline para que nos dan como resultado una un movimiento suave a través de estos puntos, pero comúnmente es muy complicado para: [5]

Movimientos naturales y movimientos complejos, es decir, movimientos que siguen las leyes de la física. Por ejemplo, una caída libre, el caminar o saltar de un cuerpo humano se rige por las leyes de la dinámica newtoniana.

La manera más eficiente de describir estas restricciones es mirar las ecuaciones matemáticas. Entonces, cada armadura tiene una relación jacobiana entre sí, las velocidades  $q$  en las articulaciones de la armadura, la velocidad instantánea  $t$  en el "punto final" de la armadura : [4]

$$t = \dot{J}q \quad (1)$$

$J$  es la matriz cuyas columnas contienen cada una el punto final generado por la velocidad en la articulación correspondiente ,en el modelado cinemático de posición de un robot manipulador se establecen las relaciones existentes entre el espacio operacional (en el cual la localización del órgano terminal está definida) y el espacio articular del robot (en el cual la configuración está definida). El modelo directo, es la relación que permite determinar el vector  $x$  de coordenadas operacionales del robot correspondiente a una configuración dada  $q$ .

$$x = f(q) \quad (2)$$

El modelo geométrico directo de un robot se puede obtener a partir de la matriz de transformación homogénea del robot que define al marco  $n$  del eslabón terminal con respecto al marco  $0$  de la base del robot. En el caso de robots de estructura simple la matriz de transformación está dada por:

$${}^0T_n = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots {}^{n-1}T_n = \begin{pmatrix} {}^0s_n & {}^0n_n & {}^0a_n & {}^0p_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

La matriz de transformación  ${}^fT_E$  define un marco de la herramienta del órgano terminal  $E$  con respecto a una base fija  $f$ , esta matriz se puede calcular mediante:

$${}^fT_E = Z^0T_n E \quad (4)$$

B.1 Modelado cinemático directo de los dedos robóticos.

A continuación, se muestran las tablas de parámetros Denavit-Hartenberg el cual es un método sistemático para describir la relación cinemática entre un par de eslabones adyacentes, que forman parte de una cadena cinemática abierta para los dedos uno, dos, tres, cuatro y cinco, los cuales constituyen el sistema robótico para manipulación, por conveniencia los llamaremos a estos parámetros sólo parámetros DH.

TABLA I. PARÁMETROS DH PARA DEDO UNO

Eslabón	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	90	0	$\theta_2$	0
3	0	$D_3$	$\theta_3$	0
4	0	$D_4$	$\theta_4$	0
5	0	$D_5$	$\theta_5$	0

TABLA I. PARÁMETROS DH PARA DEDO DOS

Eslabón	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	90	0	$\theta_2$	0
3	0	$D_3$	$\theta_3$	0
4	0	$D_4$	$\theta_4$	0
5	0	$D_5$	$\theta_5$	0

TABLA I. PARÁMETROS DH PARA DEDO TRES

Eslabón	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	90	0	$\theta_2$	0
3	0	$D_3$	$\theta_3$	0

4	0	$D_4$	$\theta_4$	0
5	0	$D_5$	$\theta_5$	0

TABLA I. PARÁMETROS DH PARA DEDO CUATRO

Eslabón	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	90	0	$\theta_2$	0
3	0	$D_3$	$\theta_3$	0
4	0	$D_4$	$\theta_4$	0
5	0	$D_5$	$\theta_5$	0

TABLA I. PARÁMETROS DH PARA DEDO CINCO

Eslabón	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
1	0	0	$\theta_1$	0
2	90	0	$\theta_2$	0
3	0	$D_3$	$\theta_3$	0
4	0	$D_4$	$\theta_4$	0
5	0	$D_5$	$\theta_5$	0

C. Simulación

Con las ecuaciones matemáticas ya establecidas continuamos con la presentación de los modelos 3d.

En primer lugar, se muestra el rediseño de la parte final del dedo robótico en Blender, la vista que se muestra es una versión renderizada de la armadura "Fig.1" y en seguida la armadura completa de uno de los dedos "Fig.2".



Fig 1. Falange Proximal



Fig 2. Dedo Robótico Completo

A continuación, las capturas del sistema robótico completo, en estas capturas se aprecia al robot manipulando un objeto de forma cúbica de dimensiones aproximadas de 10 cm por cada lado “Fig.3”.

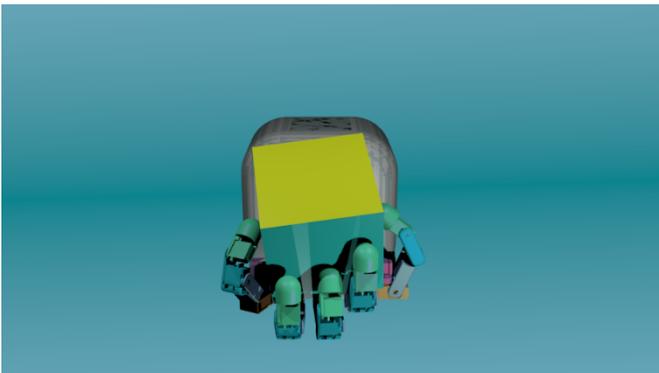


Fig 3. Mano robótica manipulando objeto

Al final con una integración de todo lo expuesto y con los modelos ya renderizados se logró que el sistema manipulara un cubo llevándolo de un color a otro en este caso del color amarillo al azul “Fig. 4”, [6].

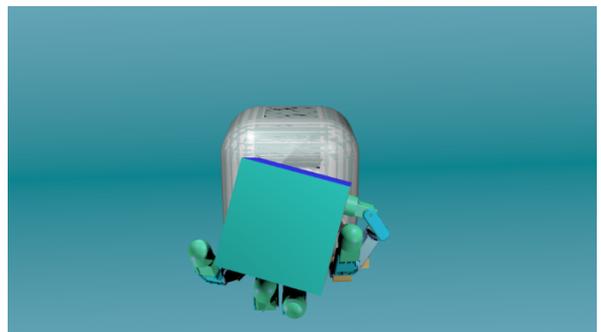
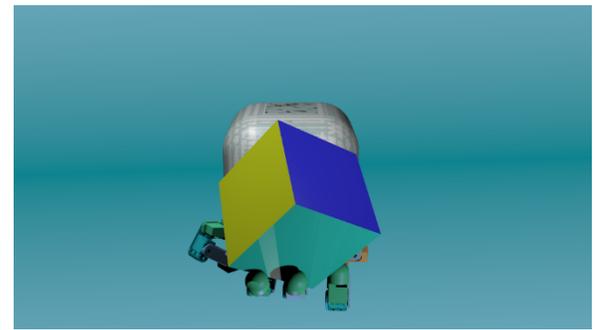
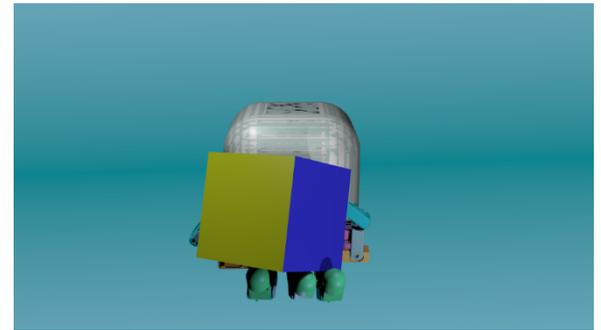
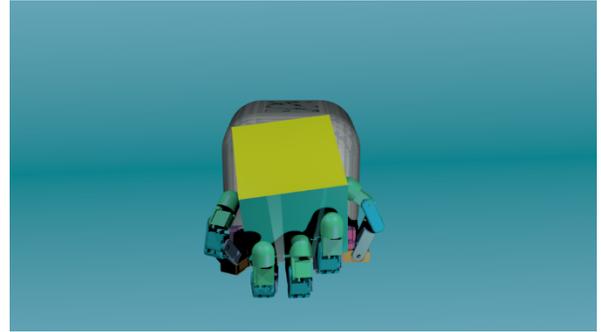


Fig 4. Sistema robótico manipulando objeto

### 3. Conclusiones

El objetivo de este trabajo fue responder a incógnitas tales como son el diseñar una mano robótica antropomórfica que imite con fidelidad las características biológicas y que pueda servir de herramienta para la manipulación de intrincadas geometrías.

Entusiasmados por los muchos usos existentes y viables, el campo de la manipulación está evolucionando y recibiendo más consideración trayendo consigo adelantos y mejoras cada vez mejores. A pesar de los retos, existen cuantiosas oportunidades para investigaciones muy valiosas. Gracias a este tipo de tecnologías y prototipado rápido nos han ofrecido muchos enfoques nuevos para fabricación eficiente de piezas complejas a bajo costo,

### 4. Referencias

- [1] E. P. Flores, “Diseño del mecanismo actuador de un dedo robot antropomórfico” “Design of the drive mechanism for an anthropomorphic robotic finger” pp. 153–162, 2011.
- [2] M. Solís, J. Francisco, E. O. Botja, A. F. Ramírez, R. G. Andrade, and A. M. Reyes, ““NUEVO DISEÑO DE DEDO ROBÓTICO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA ROBÓTICO PARA MANIPULACIÓN,”” vol. 40, pp. 205–210, 2018.
- [3] D. Alejandro, Z. Tenesaca, D. Miguel, and A. Zeas, “Diseño y construcción de una mano robótica para la enseñanza del alfabeto dactilológico universal para personas sordomudas,” *Ingenius, Cienc. y Tecnol.*, p. 18, 2011.
- [4] H. Bruyninckx, “Blender for robotics and robotics for Blender,” *Mech. Eng.*, pp. 1–6.
- [5] R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, *Grasp statics. In: A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton, FL: CRC*, vol. 29. 1994.
- [6] © Copyright : This page is licensed under a CC-BY-SA 4.0 Int. License., “Blender 2.79.” [Online]. Available: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/index.html>.

# Control de un Brazo Robótico de 3 grados de libertad en Matlab GUIDE.

J. Tenorio Tapia, J. G. Cebada Reyes, A. Michua Camarillo.  
Universidad del Valle de Puebla, Depto. De Ingeniería.  
geott97@gmail.com, jose.cebada@uwp.com.mx

**Resumen**— En el presente documento se trabaja con un brazo robótico de 4 grados de libertad modelo K - 680 limitándonos a trabajar con 3 grados de libertad con el objetivo de desarrollar un controlador PID para el control de posicionamiento del robot, haciendo que al declarar una Posición Deseada el robot pueda moverse a la Posición ya mencionada por el usuario. Primero se obtendrá el Modelo Dinámico del robot mediante Euler - La Grange para posteriormente diseñar una Interfaz Gráfica (GUI) en el software Matlab y programar el controlador digitalmente. Y finalmente para el análisis de resultados se cuenta con sustento matemático y el proceso de la elaboración del trabajo.

*Palabras clave.* Matlab GUIDE, Euler La - Grange, brazo robótico K - 680.

## 1. Introducción

Un robot es un manipulador multifuncional reprogramable diseñado para mover materiales, partes, herramientas o dispositivos especializados a través de movimientos programados para la ejecución de una variable de tareas [1]. Desde una vista industrial, un robot es una herramienta importante en el ámbito de procesos de manufactura y producción ya que con la ayuda de

Existen en el mercado una gran variedad de prototipos robóticos con fines de entretenimiento para niños, ya sean de tipos móviles, manipuladores o con fines de aprendizaje en el área de robótica. En la mayoría de estos prototipos son fáciles de armar, manejar y conlleva solo una tarea que es la del propio fabricante para lo que es hecho de uso didáctico. Por otra parte, en el área de robótica llevan a cabo prototipos robóticos con fines de aprendizaje y conocimiento de estos, tanto el comportamiento como las tareas planeadas que uno requiere que haga de dicho robot, en algunos casos el material que se utiliza para el desarrollo de estos conlleva precios altos en el caso de tener un prototipo preciso de buena calidad o en la colocación de sensores que se requiere donde no debe de tener pérdida de datos, una frecuencia de datos rápida y adaptable a dicho prototipo. Es por ello que para este trabajo se adaptara un prototipo brazo robótico modelo K-680 que está en venta en el mercado donde no solo se puede utilizar como uso didáctico, también se puede aprovechar para sacar más información y provecho en cuestión de investigaciones, en este caso se utilizara para estudios de fenómenos de control que pueda existir de una forma más económica.

En la 2 sección se llevara a cabo la elaboración del Modelo Dinámico del robot mediante el método de Euler - LaGrange así como el moldeo de energías que existen, en la sección 3 se explica a detalle la elaboración del control del brazo robótico, en la sección 4 el desarrollo experimental que se lleva y la sección 5 los resultados que se obtuvieron de la sección anterior.

## 2. MODELO DINAMICO DEL SISTEMA ROBOTICO.

El modelo dinámico del robot manipulador permite explicar todos los fenómenos físicos que se encuentran en su estructura mecánica, tales como efectos de inercia, fuerzas centrípetas y de coriolis, par gravitacional y de fricción los cuales son fenómenos físicos intrínsecos o propios de la naturaleza dinámica del robot [2].

Para saber el Modelo Dinámico de un sistema existen métodos para el desarrollo de las ecuaciones que lo rigen, un método ampliamente utilizado para obtener la dinámica del robot es el *método de Euler - La Grange* donde mediante energías que interactúan en el sistema junto con ecuaciones que lo rigen este método, podemos hallar como se comportara el sistema. Primeramente debemos tener en cuenta que las energías que interactúan son *Energía Cinética*  $\mathcal{K}(q, \dot{q})$  y *Energía Potencial*  $\mathcal{U}(q)$ , donde componen la ecuación Lagrangiano  $\mathcal{L}(q, \dot{q})$  que conlleva una diferencia de las energías mencionadas.

$$\mathcal{L}(q, \dot{q}) = \mathcal{K}(q, \dot{q}) - \mathcal{U}(q) \quad (1)$$

Teniendo la ecuación Lagrangiano, procede a aplicarlo con la ecuación de *Euler La - Grange* donde involucra una diferencia de derivadas parciales de posicionamiento  $q$  y se iguala a un torque final que es la salida de movimiento que proporciona cada uno de los eslabones del sistema.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q} = \tau \quad (2)$$

Sabiendo que para sistemas robóticos tiene  $n$  grados de libertad, para la ecuación (2) se deben de resolver para los grados de libertad que existan.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(q, \dot{q})}{\partial q_i} = \tau_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Teniendo las ecuaciones dependiendo de los grados de libertad, obtenemos el *modelado de energías dinámicas del robot manipuladores* cuya expresión matemática es:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\tau, \dot{q}) = \tau \quad (4)$$

Donde  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  son el vector de posición, velocidad y aceleración articular del robot,  $M(q)$  representa la matriz de inercia,  $C(q, \dot{q})$  es la matriz de fuerza centrípeta y de Coriolis,  $g(q)$  es el par gravitacional y  $f(\tau, \dot{q})$  es el vector de fricción, finalmente se iguala a  $\tau$  que es el torque de salida. En ausencia del vector de fricción, la ecuación matemática queda de la siguiente manera para modelos dinámicos de  $n$  grados de libertad.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \quad (5)$$

### 3. BRAZO ROBOTICO MODELO K - 680.

Partiendo de prototipos robóticos que existen en el mercado desde robots manipuladores y móviles, se trabajara con un brazo robótico antropomórfico modelo K - 680, es un robot de 4 grados de libertad más el movimiento de la garra y la apertura de la garra para que pueda agarrar objetos pequeños y no tan pesados, es de tipo antropomórfico debido a la configuración que más se utiliza debido a la destreza que presenta el movimiento del extremo final como una consecuencia de sus tres articulaciones rotacionales [3].



Fig. 1. Brazo Robótico modelo K - 680.

En la parte interna de cada eslabón del robot lleva una configuración de engranaje proporcionándonos un torque donde en cada eslabón queda intacto al menos que se le agregue una tensión simétrica para el giro del motor, en la Tabla I muestra el número de eslabón junto con su rango angular de libertad.

TABLA I. NUMERO DE ESLABÓN Y RANGO DE ANGULO.

Eslabón	Rango de ángulo
1° eslabón – Base	0° - 270°
2° eslabón – Hombro	0° - 180°
3° eslabón – Codo	0° - 300°

En este caso, limitaremos el rango angular debido a que solo tomaremos la parte frontal de movimiento que tiene, en la Tabla II muestra los rangos angulares limitados.

TABLA II. LIMITACION DE RANGO ANGULAR.

Eslabón	Limitación de Rango Angular
1° eslabón – Base	0° - 180°
2° eslabón – Hombro	0° - 90°
3° eslabón – Codo	0° - 180°

### 4. SISTEMA DE CONTROL.

Para el conjunto de control del robot se aplicara de tipo lazo cerrado donde está constituido por un sistema de lazo abierto solo que al final se retroalimentara para tomar el valor de salida de la posición deseada y la pasara por un punto suma donde tendremos un *Error de posición* que se corregirá hasta llegar un valor de cero, al tener el error de posición igual a 0 esto quiere decir que llego a la posición deseada, en la figura 2 muestra el diagrama de bloques del control de lazo cerrado.

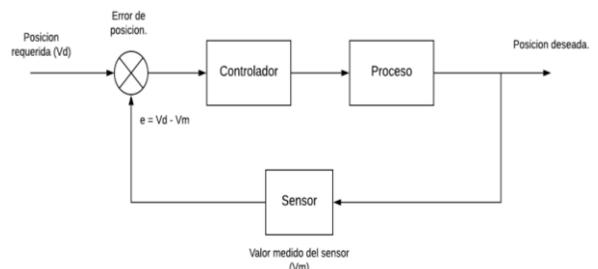


Fig. 2. Control de lazo cerrado.

Para construir el control mencionado es necesario conocer la variable que se controlara y el sensor a utilizar para poder medir y retroalimentar el error que está generando mediante una diferencia entre la *Posición Deseada*  $V_d$  menos *Valor Medido*  $V_m$  donde:

$$e = V_d - V_m \quad (6)$$

#### 4.1 Lazo de control electrónico y sensores.

El control del brazo robótico está hecho con un ordenador donde se programara todo el control en un GUIDE en el software Matlab en tiempo real junto con toda la electrónica y etapa de potencia que se requiere para el manejo de los motores, en la figura 3 muestra la conexión de la electrónica requerida para el control de los motores.

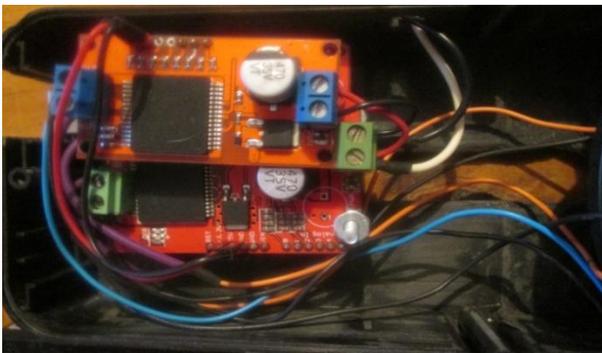


Fig. 3. Dispositivos electrónicos de potencia para motores.

Para la conexión de la interfaz se utiliza Tarjetas Arduino donde se manipulara por Maestro y Esclavo, el Maestro controlara la etapa de potencia de los motores con una Tarjeta Arduino UNO con una Monster Motor Shield VNH2SP30 que es un puente H doble más un Driver individual de la misma matricula, se controlara el sentido de giro y la potencia requerida para mover cada uno de los eslabones del robot, se alimentara con una fuente de poder de 12V solo que se limitara a 5V que es lo que el fabricante recomienda para alimentar. Por otra parte, los Esclavos estarán manejando sensores IMU – MPU6050 que es un tipo de sensor Acelerómetro/Giroscopio como su nombre lo dice mide aceleraciones mediante un plano en 3 ejes o velocidades angulares con Roll, Pitch and Yaw, se utilizó las mediciones de inclinaciones mediante velocidades angulares por Roll, Pitch and Yaw ya que podemos acomodar los sensores de una forma que no obstruya el movimiento de cada eslabón y que no se tenga problemas en moverlo. Para este robot los eslabones son rotacionales, por lo tanto los sensores estarán situados donde genere movimiento rotacional, el sensor MPU6050 se maneja mediante protocolo  $I^2C$  que se limita la conexión para manejar más sensores con una sola tarjeta, así que cada sensor estará conectado a un individual Arduino

NANO para no tener problemas en obtención de datos de cada movimiento del eslabón. La programación del control del robot será en un GUIDE de Matlab la conexión para los Esclavos se maneja serialmente y para el Maestro con la ayuda de un sketch podemos conectarlo en una interfaz gráfica (GUI).

#### 4.2 Interfaz gráfica en Matlab.

El software Matlab tiene una función llamada GUIDE donde nos otorga el desarrollo de interfaces gráficas para cualquier aplicación que podamos realizar y nos permite trabajar con hardware, incluye varios objetos que se pueden utilizar desde botones, etiquetas, listbox para las necesidades que uno requiera. Mencionado anteriormente, se programó la parte de control en tiempo real para la digitación de las posiciones individuales en cada uno de los eslabones, en la figura 5 muestra la interfaz gráfica donde tendremos todo el control del brazo robótico.

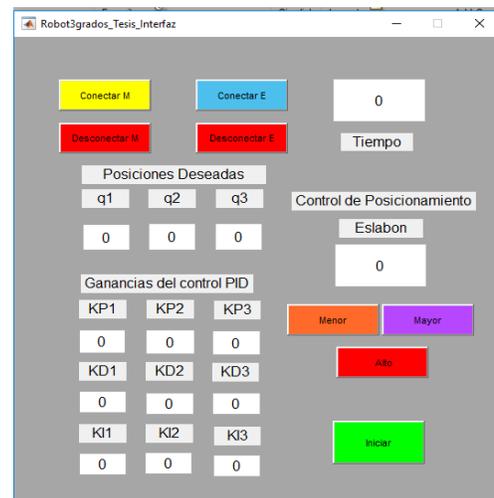


Fig. 5. Interfaz Gráfica para control del brazo robótico.

En la parte de la interfaz contiene muchos objetos donde están colocados en secciones, en la parte de *Conectar/Desconectar Maestro - Esclavo* conectaremos y desconectaremos los Arduinos que controlan tanto los motores como los sensores, en la parte de *Control de Posicionamiento* selecciona el eslabón para poderlo moverlo ya sea de un sentido a otro con una mínima potencia, en *Posiciones Deseadas* digitaremos en qué posición (en grados) queremos que este cada uno de los eslabones, las *Ganancias de Control PID* digitaremos las ganancias correspondientes para cada punto del control (proporcional, derivativo, integral) y por último el *Tiempo* asignamos un tiempo en segundos y el botón de *Iniciar* ejecutamos el código.

Por parte de la programación del control se programó un PID digital, como dicho trabajo se trabajara en tiempo real al declarar un tiempo ejecutara el código en ese rango de tiempo, primeramente se realizó un *Error de Posición*  $\tilde{q}$  de las cuales es una diferencia de la *Posición Deseada*  $V_d$  con el *Valor Medido*  $V_m$  donde nuestro  $V_d$  será declarado en la aplicación y el  $V_m$  estará midiendo el valor angular del eslabón, para un control PID su expresión matemática es la siguiente.

$$U = k_p * \tilde{q} + k_D * \dot{\tilde{q}} + k_i * \int \tilde{q} \quad (7)$$

Donde  $\tilde{q}$ ,  $\dot{\tilde{q}}$ ,  $\int \tilde{q}$  es el error, error derivado y error integrado y  $k_p, k_D, k_i$  son las ganancias de proporcional, derivativo e integral, para obtener el error derivado e integral se debe de realizar mediante *Derivada Numérica* e *Integral Numérica* con la ayuda del error presente ya mencionado, después se realiza una suma de productos de la misma para la obtención del controlador, limitamos el controlador de un rango de 1 a -1 con tangente hiperbólica debido a que se obtenía valores grandes del controlador, antes de eso debemos de cambiarlo de grados a radianes y finalmente mediante condiciones y otros comandos realizamos el sentido de giro de los motores y la potencia que se le administrara a los drivers para mover los motores.

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Se realizó pruebas para el funcionamiento de solo el eslabón base del robot, primeramente el robot debe de estar en una posición inicial respetando los rangos de cada uno de los eslabones como se muestra en la figura 6.

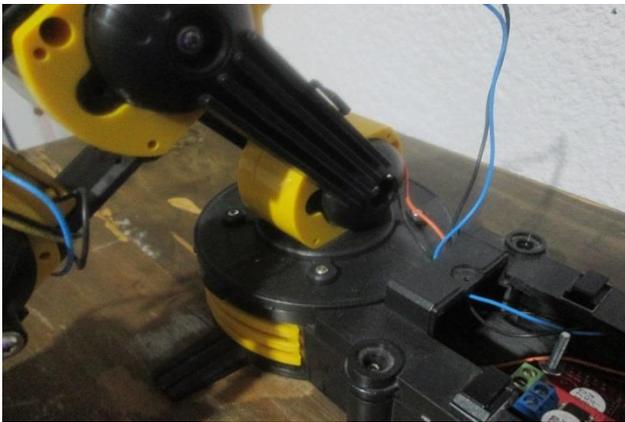


Fig. 6. Posición inicial de la base del robot.

Teniendo la posición inicial en la aplicación digitaremos una posición deseada de  $90^\circ$  para que al ejecutar el código pueda moverse a esa posición que requiere el usuario.

## 6. RESULTADOS.

Al ejecutar el código con una Posición Deseada de  $90^\circ$  en nuestra posición inicial para el eslabón de la base nos otorgó la siguiente figura.



Fig. 7. Curva de control del Valor Medido.

En la figura 7 se observa el valor medido del sensor de la base teniendo una posición de  $94^\circ$  grados las cuales tiene un error de  $4^\circ$ , genera una línea recta de  $0^\circ$  desde el tiempo 0 Segundos a 4 Segundos esto debido a que la programación contiene una máquina de estados ya que al iniciar el programa se requiere de un tiempo de espera para que pueda detectar perfectamente el sensor, al quitar ese tiempo de espera el robot tiende a no detectar bien la posición en la que está. La curva de control que se genera a partir de 5 Segundos lo lleva en crecimiento tomando directamente el valor de la Posición Deseada solo que se tiene el mínimo Error.

## 7. CONCLUSIONES.

Durante la realización de este trabajo se tuvo problemas con la comunicación entre Tarjetas Arduinos debido que se pensó en otras formas de programar el control ya que tendía a confundirse y no censaba los sensores al moverse los eslabones, otro de los problemas que se tuvo es la ubicación del tercer sensor en el 3 Grado de Libertad porque su movimiento es diferente a los dos restantes las cuales se pensó en una forma para colocarlo para que nos otorgara las medidas angulares.

## 8. REFERENCIAS.

- [1] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*, (New York: John Wiley and Sons Inc. 1976).
- [2] F. R. Cortez, *Robotica. Control de robots manipuladores*, México D.F, 2011, 253 – 258.
- [3] F. R. Cortez, *Matlab aplicado a Robótica y Mecatrónica*, México D.F, 2012, 202.

# Metrología de la red de sensores inalámbricos y del sensor de vibración aplicados al monitoreo de la torre de transmisión eléctrica para pérdidas no-técnicas.

M.H. Cruz-Díaz<sup>1,a</sup>, C.F. García-Hernández<sup>2,b</sup>, J. Meneses-Ruíz<sup>2,c</sup>, J.C. Velázquez-Hernández<sup>2,d</sup>, M. Sánchez-Brito<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup> Comisión Federal de Electricidad, Gerencia Regional de Transmisión Peninsular

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia de Control, Electrónica y Comunicaciones

<sup>a</sup> hugo.cruz03@cfe.gob.mx, <sup>b</sup> cfgarcia@ineel.mx, <sup>c</sup> jmeneses@ineel.mx, <sup>d</sup> jconrado@ineel.mx, <sup>e</sup> miguel\_sanchezbrito@hotmail.com

**Resumen**— En el presente trabajo de investigación se presenta la Metrología de la red de sensores inalámbricos y del sensor de vibración aplicados al monitoreo de la torre de transmisión eléctrica para pérdidas no-técnicas para atajar un problema real como es el robo de elementos estructurales en las torres de alta tensión, en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Peninsular (GRTP) de la C.F.E. Se efectuaron pruebas con resultados satisfactorios, en cuanto a la operación de la red de sensores inalámbricos (WSN) y sensado de vibración.

*Palabras clave.* Metrología, WSN, inalámbrica, sensor, red, torre, transmisión, eléctrica, SCADA, control supervisorio, CI, infraestructura crítica.

## 1. Introducción

En una investigación previa [1,3,16] se llegó a una solución viable técnicamente y económicamente, de redes de sensores inalámbricos (WSN) aplicadas al monitoreo de la condición física de torres de transmisión eléctrica [2,3,4,8].

Conceptualmente, los sensores usan un enlace inalámbrico de corto alcance hacia un concentrador local, el cual usa un enlace inalámbrico de largo alcance hacia un repositorio de datos central. Éste no es un requisito, pero está basado en la visión de que muchos sensores de bajo costo, bajo consumo de energía y bajo ancho de banda, serán desplegados en un sitio de torre y que un concentrador local puede ayudar a recolectar estos datos, con capacidad de repositorio local de datos redundantes y coordinando además las comunicaciones de larga distancia.

El concepto de torre instrumentada requiere una implementación personalizada basada en la población de sensores, con tasas de datos y alcances, que pueda ser conectada al sistema SCADA (Control Supervisorio y Adquisición de Datos) de la instalación central u operar de manera independiente con un SCADA dedicado.

Tanto la infraestructura de líneas de transmisión como los sensores usados para monitorear la infraestructura, definen los requerimientos para las características operacionales del sistema de comunicaciones de la torre instrumentada [1].

## 2. Metrología

Relevancia de la Metrología

“La medición es la primera etapa que conduce al control. Si no puedes medir algo, no lo puedes comprender. Si no lo

puedes comprender, no lo puedes controlar. Si no lo puedes controlar, no lo puedes mejorar” – H. J. Harrington.

La Metrología es la ciencia que estudia las mediciones. Ya que el propósito de la WSN en esta aplicación es proporcionar información para tomar decisiones, se hace necesario que los elementos sensibles sean lo más confiables posible y para darles confiabilidad es necesario que se midan ciertos parámetros para determinar su desempeño.

Todos los elementos de la WSN son importantes para la correcta operación de la misma y es difícil definir cuál es más importante o cual tiene más relevancia, sin embargo, algunos elementos son más fáciles caracterizarlos para medir su desempeño. Estos elementos son, la red de datos, el subsistema de comunicaciones y el módulo de sensado.

La red de datos adquiere importancia, ya que mediante ella se realiza la comunicación entre toda la WSN (lenguajes de programación, protocolos, ruteos) y entre la WSN hacia el mundo exterior, por lo tanto al convivir con otros sistemas de supervisión en el SCADAWEB, es necesario medir algunos parámetros de la red como son latencia, retardos, colisiones, tráfico y es ahí donde la metrología participa con el desarrollo de paquetes informáticos como el Zabbix y es empleado en la GRTP para el desempeño de redes de datos.

Por otro lado tanto, el subsistema de comunicaciones como el módulo de sensado responden a fenómenos físicos.

El subsistema de comunicaciones se basa en la propagación de ondas electromagnéticas a través de un medio (el aire), es decir el transceptor de cada nodo sensor inalámbrico se encarga de transmitir una frecuencia específica hacia el nodo recolector y de los recolectores hacia los concentradores. En esta aplicación, el empleo de la metrología servirá para determinar las desviaciones en frecuencia de los transceptores, ya que al ser dispositivos sintonizados deben de permanecer en su frecuencia asignada e idealmente sin desviaciones. En la sección 3 se menciona un ejemplo de una calibración para determinar el error (desviación) de frecuencia del transceptor, con respecto a un equipo patrón de referencia, y cuantificar la incertidumbre inherente al proceso de calibración. De igual

manera el módulo de sensado responde a un fenómeno físico (efecto piezoeléctrico), por lo que también es posible determinar si este elemento en particular cumple con los requisitos para los cuales fue diseñado, mediante una práctica de calibración descrita en la sección 4.

Podemos resumir que la metrología tiene una amplia gama de aplicaciones, ya que cualquier proceso, evento o situación al cual se quiera conocer más a detalle, es necesario realizarle algún tipo de medición.

### A. Investigación

El enfoque de esta investigación incluye comunicaciones y sensado, con aplicación a sensado/monitoreo de torres, líneas de transmisión de energía eléctrica y dispositivos de potencia, así como los estándares y un esquema propuesto [3].

La protección de infraestructura crítica (IC) es un área de aplicación para las WSN [4]. Las amenazas tales como catástrofes naturales, ataques criminales o terroristas en contra de la IC, se han ido incrementando recientemente. Las WSN son una opción bastante prometedora para estas actividades de monitoreo [1,8]. Esta es la razón de emplear una red de sensores inalámbricos para proteger la red de transmisión de energía de eléctrica de la GRTP, inicialmente contra robo de elementos estructurales e ir incrementando el monitoreo posteriormente a otras propiedades físicas de la red eléctrica.

En la figura 1 se puede ver el esquema de la red de datos [3].

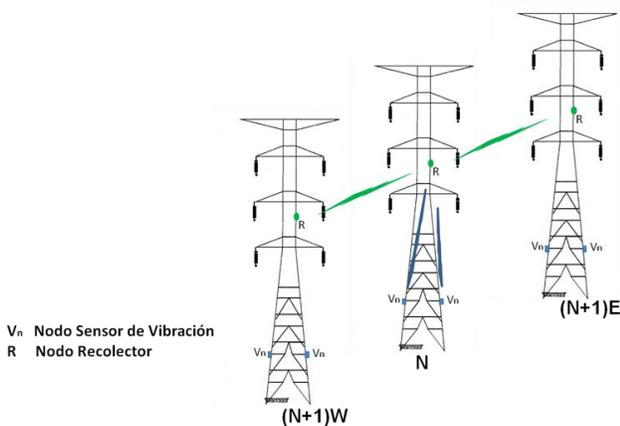


Fig 1. Propuesta de reenvío a 2 capas [16].

### 3. Metrología en redes de datos.

La Metrología es la ciencia que tiene por objeto el estudio de los sistemas de medida. La metrología comprende todos los

aspectos, tanto teóricos como prácticos, que se refieren a las mediciones, cualesquiera que sean sus incertidumbres y en cualesquiera de los campos de la ciencia y de la tecnología en que tengan lugar [3,9].

Una vez que se ha definido que es la metrología, se tratará de aplicar este concepto a las redes de datos. Se podría decir que la metrología de redes de comunicaciones consiste en medir el desempeño de las redes.

El primer trabajo significativo fue realizado por Paxson a mediados de los 90's. Usó una infraestructura de medición que le permite captar la trazas de 20 000 conexiones punto a punto TCP entre 35 servidores ("Hosts") en nueve países diferentes. El estudio de las trazas era completado con un análisis de rutas de punto a punto (determinada con la herramienta "traceroute"). Este fue el primer estudio que permite la observación de la dinámica de extremo a extremo del tráfico de Internet: enrutamiento, estabilidad, trayectorias, asimetría, TCP dinámico, los paquetes fuera de entrega, etc. [3,7,10].

Algunos de los objetivos de la metrología en las redes son: la caracterización del tráfico, modelación de tráfico, el estudio de matrices de tráfico y la cartografía de la red. La caracterización del tráfico consiste en determinar el volumen de tráfico en una red dada. También se ocupa de la variabilidad de volumen de tráfico y la naturaleza con el tiempo [3,10]. Por ejemplo la plataforma Zabbix es un Sistema de Monitoreo de Redes diseñado para monitorear y registrar el estado de varios servicios de red, servidores y hardware de red. Usa MySQL, PostgreSQL, SQLite, Oracle o IBM DB2 como base de datos. Su "backend" está escrito en C y el "frontend" web está escrito en PHP. Zabbix ofrece varias opciones de monitoreo. Chequeos simples que pueden verificar la disponibilidad y el nivel de respuesta de servicios estándar como SMTP (protocolo de transferencia de correo simple, por sus siglas en inglés) o HTTP sin necesidad de instalar ningún software sobre el servidor monitoreado. Un agente Zabbix puede también ser instalado sobre máquinas UNIX y Windows para monitorear estadísticas como carga de CPU, utilización de red, espacio en disco, etc. Como alternativa a instalar el agente sobre los servidores, Zabbix incluye soporte para monitorear vía protocolos SNMP (protocolo de administración de red simple, por sus siglas en inglés), TCP e ICMP (protocolo de administración de control de internet, por sus siglas en inglés), como también sobre IPMI, JMX, SSH, telnet y usando parámetros de configuración personalizados. Zabbix soporta una variedad de mecanismos de notificación en tiempo real, incluyendo XMPP [3,17].

Lanzado sobre los términos de la versión 2 de la "GNU General Public License", Zabbix es Software Libre y en la figura 2 se tiene un ejemplo de una red siendo monitoreada mediante Zabbix.



Fig 2. Ejemplo de monitoreo de red de datos utilizando Zabbix.

## METROLOGÍA EN EL SUBSISTEMA DE COMUNICACIONES

En este punto se procede a efectuar la calibración del módulo Transceptor nRF24L01+ [5,6,15], este proceso consiste en encontrar el error o desviación en la frecuencia de transmisión y determinar su incertidumbre.

Para encontrar la desviación en frecuencia se procederá de acuerdo a la definición error de medición [3,9] y al correcto uso unidades y escritura de cantidades [3,18]. Se emplea un equipo patrón Probador de Comunicaciones estabilizado en frecuencia mediante un oscilador de Rubidio, el cual proporciona una estabilidad de  $3.1 \times 10^{-11}$ pp. La prueba consiste en que el equipo bajo prueba, en este caso el nRF24L01+ situado a una distancia de un metro del equipo patrón, transmita una frecuencia programada, el equipo patrón se sintonizará a la misma frecuencia y empleando la función de analizador de espectros se encontrará la frecuencia real transmitida, la diferencia de frecuencias entre la programada al transmisor y la detectada por el equipo patrón constituirá el error, como se aprecia en la ecuación 1.

$$error_{frec} = frec_{nRF24L01+} - frec_{patrón}$$

ec. 1

Para cuantificar la incertidumbre se procede a determinar cuáles son las fuentes que más influencia tienen [3,11], para este caso se considera la resolución del equipo medidor (patrón), la estabilidad en frecuencia del equipo patrón y la dispersión en las mediciones. Con estas tres fuentes de incertidumbre identificadas se normalizan individualmente a un  $\sigma$  para poder combinarlas y así poder determinar la incertidumbre de medición, de acuerdo a la ley de propagación de las incertidumbres, tal como se expresa en la ecuación 2.

$$u_c = \sqrt{u_{resol}^2 + u_{est.frec}^2 + u_{disp}^2}$$

ec. 2

Donde:

$u_c$  Incertidumbre de medición combinada.

$u_{resol}$  Componente de incertidumbre por resolución del equipo patrón.

$u_{est.frec}$  Componente de incertidumbre por estabilidad en frecuencia.

$u_{disp}$  Componente de incertidumbre por dispersión en las mediciones.

Una vez determinada la incertidumbre combinada que se encuentra a  $\sigma$ , se multiplica por un factor de cobertura para indicar un intervalo de confianza (k), a ésta se le conoce como incertidumbre expandida (U)

$$U = k * u_c$$

ec. 3

#### 4. Metrología en el módulo de sensado.

La torre de transmisión al ser vandalizada va a recibir impactos, ya sea por el apoyo en ella de escaleras o andamios o ya sea por el empleo de herramientas de corte o de impacto, todas estas perturbaciones se van a traducir en vibraciones que el módulo de sensado va a registrar, pero para que esto suceda, se debe de asegurar que dicho módulo opera correctamente y una manera de asegurarse es mediante la calibración y ajuste de los sensores. Esta actividad queda fuera de la competencia del Laboratorio de Metrología de la Gerencia de Transmisión Peninsular, ya que su competencia es en Variables eléctricas y Fibra Óptica; sin embargo, en México se cuenta con varios laboratorios que manejan variables mecánicas entre ellas vibraciones, por ejemplo el de MetAs (Metrólogos Asociados).

Por otro lado el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) en su Centro de Desarrollo e Investigación en Física y

Metrología, han desarrollado un procedimiento para la calibración de acelerómetros piezoeléctricos por comparación con un patrón, según la Norma ISO 16063-21 [3,12].

La técnica consiste en colocar unidos físicamente el sensor bajo calibración y el sensor patrón, seguidamente aplicar la misma señal a los sensores y comparar la respuesta de ambos, como se puede apreciar en la figura 3, para poder determinar el error del sensor bajo prueba, de acuerdo a la fórmula 1 que se vio anteriormente.

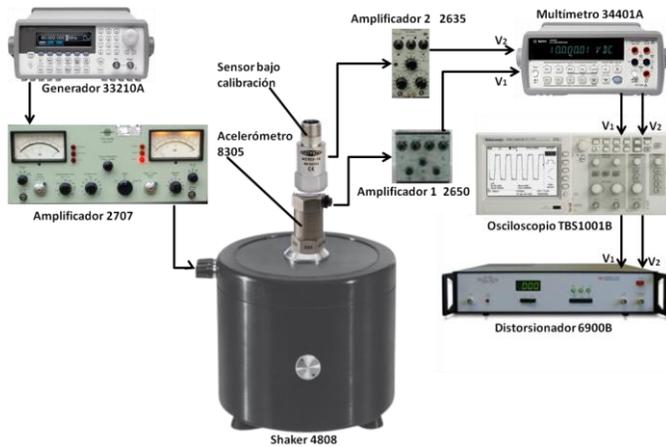


Fig 3. Diagrama a bloques de conexiones para calibración de un acelerómetro piezoeléctrico [3,12].

Para determinar la incertidumbre de la medición se tienen que considerar todas las fuentes de incertidumbre que pudieran afectar significativamente en el valor de la misma [19], para este caso en la tabla 1 se mencionan las diferentes fuentes de incertidumbre significativas y su contribución, a esto se le conoce como presupuesto de incertidumbre.

De la figura 3 se puede observar un Generador 33210<sup>a</sup> de señal, un Amplificador 2707 de la señal, alimentando a un Shaker 4808 de vibraciones, el Acelerómetro 8305 y encima de éste último el Sensor bajo calibración, con salida al Amplificador 2 2635 y otra salida al Amplificador 1 2650, que entran a un Multímetro 34401<sup>a</sup>, pasando enseguida a un Osciloscopio TB51001B y finalmente al Distorsionador 6900B. Lo anterior, respecto a las conexiones para calibración de un acelerómetro piezoeléctrico [3,12].

De la investigación previa [1,3,16] se obtuvo una solución viable técnicamente y económicamente de una Red de Sensores Inalámbricos (WSN) aplicada al monitoreo de la condición física de torres de transmisión eléctrica.

La torre instrumentada utilizó radionodos que incluyen el subsistema de energía (celda fotovoltaica y supercapacitor), el subsistema de comunicaciones inalámbricas, la unidad de procesamiento y memoria y el subsistema de sensado.

Así, a importancia de la metrología y sus diversas áreas de aplicación tanto en mediciones cualitativas como es la red de datos (información), como en mediciones cuantitativas tal y como se analizó con los módulos de comunicaciones y sensado respectivamente en el radionodo sensor.

La infraestructura de líneas de transmisión como los sensores usados para monitorear la infraestructura, definen los requerimientos para las características operacionales del sistema de comunicaciones de la torre instrumentada [1].

En la figura 4 se muestra el radionodo sensor de vibraciones.

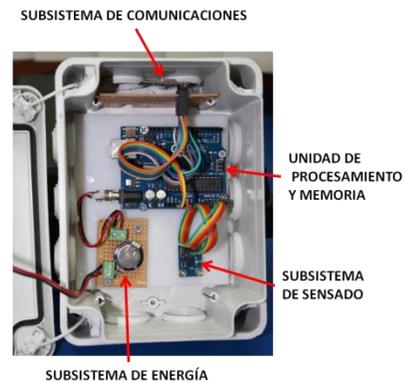


Fig 4. Nodo sensor de vibraciones.

Para el subsistema de sensado se consideró originalmente emplear un sensor de vibraciones piezoeléctrico modelo SEN4031P, sin embargo ante la dificultad de conseguirlo, se reemplaza por el módulo GY-61, constituido básicamente por un acelerómetro ADXL 335 y un regulador de tensión, como se aprecia en la figura 5.

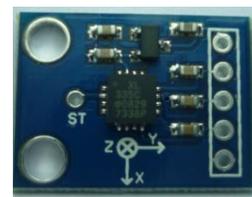


Fig 5. Módulo GY-61 (acelerómetro).

El acelerómetro es sensible a las perturbaciones mecánicas, pero cuando éstas cesan vuelve a sus valores iniciales, por lo tanto se considera apropiado para los fines del presente estudio.

Tabla 1 Determinación de la incertidumbre en la calibración de un acelerómetro piezoeléctrico [3,12].

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Incertidumbre expandida estimada de los componentes (%)</i>	<i>Modelo de distribución</i>	<i>Factor <math>x_i</math></i>	<i>Coefficiente de Sensibilidad <math>c_i</math></i>	<i>Contribución relativa <math>u_{rel,i}</math> (<math>y</math>) (%)</i>
$S_1$	Calibración del conjunto patrón	1	Normal (k=2)	0.5	1	0.5
$S_{1,s}$	Drift del patrón (1 año a 0.05% año, espec)	0.05	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.029
$S_{A,cal}$	Incertidumbre en la calibración del amplificador, calculada	0.5	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	-1	0.29
$V_R$	Medición de las dos tensiones eléctricas y en cálculo de la razón	0.3	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.17
$I(V_{R,T})$	Influencia de la temperatura sobre $V_r$	0.36	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.21
$I(V_{R,s})$	Diferencia máx. tolerada entre nivel patrón antes y después de la calibración: 0.2%	0.2	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.12
$I(V_{R,N})$	Influencia de los parámetros de montaje (cable, conector, torque, máximo 0.5%)	0.5	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.29
$I(V_{R,d})$	Influencia de la distorsión por 3a. Armónica y por diferencia de pendientes entre los acelerómetros (-2% por década). Resultado: raíz cuadrada del cociente de los cuadrados del calibrando y el patrón).	0.0025	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.0014
$I(V_{R,v})$	Efecto de sensibilidades transversales: del Excitador, $a_T$ máx. 15%, del patrón 2% (especif.) y del calibrando 5% máx.	Fórmula de von Martens ((( $S_v,2$ ) <sup>2</sup> +( $S_v,1$ ) <sup>2</sup> ) aT <sup>2</sup> ) <sup>1/2</sup> = 0.80 + N4	Rectangular	$1/(18^{1/2})$	1	0.19
$I(V_{R,e})$	Influencia VR de las tensiones	0.25	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.14
$I(V_{R,r})$	Influencia del movimiento relativo	0.1	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.058

Tabla 1 (cont.) Determinación de la incertidumbre en la calibración de un acelerómetro piezoeléctrico [3,12].

<i>Cantidad</i>	<i>Descripción</i>	<i>Incertidumbre expandida estimada de los componentes (%)</i>	<i>Modelo de distribución</i>	<i>Factor <math>x_i</math></i>	<i>Coefficiente de Sensibilidad <math>c_i</math></i>	<i>Contribución relativa <math>u_{rel,i}</math> (<math>y</math>) (%)</i>
$I(V_{R,L})$	Influencia de la alinealidad de los transductores	0.03	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.017
$I(V_{R,I})$	Influencia de la alinealidad de los amplificadores	0.08	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.046
$I(V_{R,G})$	Influencia de la gravedad	0	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0
$I(V_{R,B})$	Influencia del campo magnético del excitador	0.03	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.017
$I(V_{R,E})$	Influencia de otros efectos ambientales	0.1	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.058
$I(V_{R,RE})$	Influencia de otros efectos residuales (aleatorio por repetidas mediciones, desvío de la media aritmética,..)	0.05	Rectangular	$1/(3^{1/2})$	1	0.029
$u_{rel}(S_2)$	Incertidumbre en la Sensibilidad del acelerómetro calibrado		Incertidumbre estándar ( $k=1$ )			<b>0.76</b>
<b>Incertidumbre estándar expandida (<math>k=2</math>):</b>	<b><math>U_{rel,95}(S_2) = 1.51\%</math></b>					

De la tabla 1, respecto a la determinación de la incertidumbre en la calibración de un acelerómetro piezoeléctrico [3,12], se pueden observar las diferentes fuentes de incertidumbre significativas y su contribución, a esto se le conoce como presupuesto de incertidumbre.

Se consideró lo siguiente: Incertidumbre expandida estimada de los componentes (%), Modelo de distribución, Factor  $x_i$ , Coeficiente de Sensibilidad  $c_i$  y Contribución relativa  $u_{rel,i}$  (%).

Como resultado de la tabla 1, en el penúltimo renglón se menciona la Incertidumbre en la Sensibilidad del acelerómetro calibrado con un valor de 0.76 y finalmente, en el último

renglón se menciona la Incertidumbre estándar expandida ( $k=2$ ) así:  $U_{rel,95}(S_2) = 1.51\%$ .

Lo anterior, consideró las incertidumbres de diferentes elementos, las influencias, las mediciones, los efectos de sensibilidades transversales, las diferencias máximas toleradas, los corrimientos y las calibraciones, como se pueden observar en la segunda columna (Descripción) de la tabla 1, del presupuesto de incertidumbre.

En la figura 6 se muestra el mapa unifilar de líneas de transmisión de la Gerencia Regional de Transmisión Peninsular de la C.F.E. [13,14].

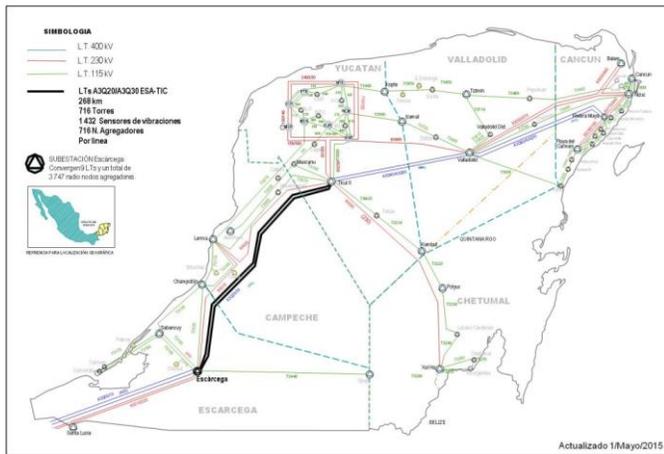


Fig 6. Ubicación de la LT con mayor longitud y la SE más congestionada.

## 5. Trabajos futuros

Se sugiere como trabajo futuro, respecto a la metrología, llevar a cabo pruebas, análisis de resultados y ajustes, así como proponer un despliegue generalizado de los nodos de la WSN para toda la red de transmisión de la C.F.E.

## 6. Conclusiones

En la GRTP se han implementado algunos mecanismos para el monitoreo de la infraestructura crítica, sin embargo no han sido del todo exitosos, por lo que se plantea el uso de sensores inalámbricos para conformar una red de monitoreo y poder hacer frente a uno de los principales problemas que aqueja a la red de transmisión como lo es el robo de elementos estructurales. Por otro lado se menciona la importancia de la metrología y sus diversas áreas de aplicación tanto en mediciones cualitativas como es la red de datos (información), como en mediciones cuantitativas tal y como se analizó con los módulos de comunicaciones y sensado respectivamente en el nodo sensor.

Se efectuaron pruebas y los resultados fueron satisfactorios, en cuanto a la operación de la WSN y el sensado de vibración.

En conclusión, la contribución de este trabajo de investigaciones la propuesta del empleo de dispositivos de muy fácil adquisición e implementación para atajar un problema real como es el robo de elementos estructurales en las torres de alta tensión, en el ámbito de la Gerencia Regional de Transmisión Peninsular de la C.F.E.

## 7. Referencias

[1] M. H. Cruz-Díaz, C. F. García-Hernández y J. Meneses-Ruiz, «Una solución para el monitoreo de la condición física de la torre de transmisión eléctrica» XI Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico CIINDET 2014, No. 280, Cuernavaca México, Abril 2-4, 2014, pp. 1-13.

[2] Future Inspection of Overhead Transmission Lines, Electric Power Research Institute, EPRI Report No. 1016921, Technical Update, May 2008, pp. 88.

[3] M. H. Cruz-Díaz, «Una solución para el sensado de las propiedades físicas de las líneas de transmisión de energía eléctrica utilizando una red de sensores inalámbricos», Tesis de Maestría, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias-INEEL, 2017, pp. 1-127.

[4] L. Buttyán, «Application of Wireless Sensor Networks in Critical Infrastructure Protection: Challenges and Design Options» IEEE Wireless Communications, pp. 44-49, October 2010.

[5] J. M. Ruiz Gutiérrez, Arduino: Manual de Programación, San Francisco, Ca: Creative Commons, 2007.

[6] «Nordic Semiconductor» [En línea]. Disponible: <http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01P>. [Último acceso: 16/junio/2015].

[7] D. Marcano, «Conceptos y Elementos Básicos de Tráfico en Telecomunicaciones» [En línea]. Disponible: [http://dateca.unad.edu.co/contenidos/208062/Contenidos/3.1\\_Documnto\\_Conceptos\\_y\\_Elementos\\_Basicos\\_de\\_Trafico\\_en\\_Telecomunicaciones.pdf](http://dateca.unad.edu.co/contenidos/208062/Contenidos/3.1_Documnto_Conceptos_y_Elementos_Basicos_de_Trafico_en_Telecomunicaciones.pdf). [Último acceso: 14/11/2016].

[8] P. Wang, H. Hou, X. He, C. Wang, T. Xu y Y. Li, «Survey on Application of Wireless Sensor Network in Smart grid» Procedia Computer Science, pp. 1212-1216, 2015.

[9] Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C., Vocabulario Internacional de metrología - Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM) NMZ-Z-055-IMNC-2009, Distrito Federal, México, 2009, p. 64.

[10] F. Michaut y F. Lepage, «Application-Oriented Network Metrology: Metrics and Active Measurement Tools» IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 7, n° 2, pp. 02-22, 2005.

[11] Instituto Mexicano de Normalización y Certificación A.C., Guía para la estimación de la incertidumbre NMZ-CH-140-INMC-2002, Distrito Federal, México, 2002.

[12] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Calibración Secundaria de Acelerómetros Piezoeléctricos por Comparación con un Patrón según la Norma ISO 16063-21, 2014.

[13] Comisión Federal de Electricidad - Subgerencia de Ingeniería Básica CFE GPTT, Torre Tipo 2x2 230 kV, Fabricante AESA, 1989.

[14] Comisión Federal de Electricidad - CFE, México, D.F., 2014.

[15] G. Pages, «Tmrh20.github.io Project and library class documentation» [En línea]. Disponible: <http://tmrh20.github.io/>. [Último acceso: 6/10/2016].

[16] M.H. Cruz-Díaz, C.F. García-Hernández, J. Meneses-Ruiz, J.C. Velázquez-Hernández, M. Sánchez-Brito, Prueba piloto del monitoreo de los elementos estructurales de la torre de transmisión eléctrica para pérdidas no-técnicas, IEEE XIV Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, CIINDET 2018, No. 12, Cuernavaca Morelos México, 21-23 de Marzo de 2018, pp. 1-8.

[17] R. Olups, Zabbix 1.8 Network Monitoring, Primera ed., Packt Publishing Ltd., 2010, p. 428.

[18] Secretaría de Economía, Norma Oficial Mexicana NOM-008-SCFI-2002, México, D.F., 2002.

[19] Buró Internacional de Pesas y Medidas BIMP, Guide to the expression of uncertainty in measurement GUM, 2008.

## 8. Biografías

**Melchor Hugo Cruz-Díaz.** Ingeniero Electrónico en Comunicaciones egresado del Instituto Tecnológico de Mérida, actualmente se encuentra como metrologo en el Laboratorio de Metrología de la Subgerencia de Protecciones (SP), Gerencia Regional de Transmisión Peninsular (GRTP), Dirección de Transmisión (DT), de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

**Carlos Felipe García-Hernández** [M'87,SM'99]. Obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica en la Universidad de Guanajuato en 1983 y su grado de Maestría en Sistemas de Telecomunicaciones en la Universidad de Essex, Inglaterra, en 1986. Ha

publicado diversos artículos Nacionales e Internacionales, presentado Conferencias y dirigido varias Tesis de Licenciatura y de Maestría. Asimismo, ha recibido cursos de adiestramiento Profesional en Estados Unidos e imparte cursos Profesionales a nivel Nacional y de Maestría desde 1987 a 2017 en el Cenidet del TecNM de la SEP. Labora como investigador y Jefe de Proyectos de Radiocomunicaciones y Telecomunicaciones en la Gerencia de Control, Electrónica y Comunicaciones del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL) desde 1983 y ha dirigido varios Proyectos sobre Redes Inalámbricas y Móviles. Además, fue Investigador Nacional Nivel-I de 1987 a 1993, es un Investigador Estatal Nivel-B en el Estado de Morelos desde 2012, es Miembro Senior del IEEE, Miembro Corresponding del CIGRE y Miembro del CIME, y está certificado como Perito en Telecomunicaciones con registro No. 555 e IFT-P-0039-2017 del Instituto Federal de Telecomunicaciones de la SCT con la Especialidad de Radiocomunicaciones desde 1993 abarcando las especialidades de Comunicaciones Espaciales, Telefonía, Teleinformática y Sistemas Especiales, y ahí mismo también está certificado como Radioaficionado Clase II con registro No. 10013 desde 1999 con indicativo XE1RFG. Y tiene la Certificación en Entrenamiento KENWOOD Digital FDMA convencional y troncalizado de la Universidad SYSCOM de 2014-2015, en Redes de Radios Digitales VHF y UHF con IP.

**Javier Meneses-Ruíz** [M'95,SM'2016]. Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México en 1984. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias en 1986 en el Instituto de Ciencia y Tecnología de la Universidad de Manchester, UMIST Inglaterra. Desde 1983 es investigador del Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Control, Electrónica y Comunicaciones, donde ha participado y dirigido proyectos de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Ingeniería, Consultoría y Análisis sobre Sistemas y Tecnologías de Telecomunicaciones para Sistemas de Potencia y Centros de Control de Energía. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores de 1987 a 1993. Es miembro del IEEE y del Comité de Especialistas en Telecomunicaciones de CFE Distribución-LAPEM –IIE.

**José Conrado Velázquez-Hernández.** Is an Electronics Engineer by the Orizaba Institute of Technology, (1992) Mexico, and obtained a Master's of Science degree in Digital Systems from the National Polytechnic Institute, (2001) Mexico. He has been a researcher and project manager in the Control and Instrumentation Department at the Electrical Research Institute since 1993. His research interests are digital communications and interoperability of digital communication systems. He has been responsible for many research projects with the electrical industry of Mexico. Has published more than twenty technical papers in international conferences and journals. He is a member of the State Reseachers System.

**Miguel Sánchez-Brito.** Obtuvo su grado de Ingeniero Industrial en el Instituto Tecnológico de Zacatepec y su grado de Maestría en Ciencias de la Computación con Especialidad en Inteligencia Artificial en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (Cenidet). Trabaja en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), participando en proyectos y ha publicado varios artículos técnicos nacionales e internacionales.

# On the Monte Carlo Simulation to Evaluate the GPSR performance.

José Luis Sánchez Chacón<sup>1,a</sup>, Dra. J. Castañeda-Camacho<sup>1,b</sup>, M.I. José Miguel Hurtado Madrid<sup>2,c</sup>, Dra. L-Cortez<sup>1,d</sup>,  
Marcelino Luis Guadalupe<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Electronics Science.

<sup>2</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Faculty of Computer Science..

<sup>a</sup> *chacon\_wheelg03@hotmail.com*, <sup>b</sup> *josefinacastaneda@yahoo.com.mx*, <sup>c</sup> *miguel.hurtado@correo.buap.mx*, <sup>d</sup> *lcortez@ece.buap.mx*, <sup>e</sup> *marcelino.luis@alumno.buap.mx*

**Abstract**— Geographic routing protocols for wireless sensor networks have received more attention in recent years, the GPSR algorithm is a geographic routing protocol and is the combination of Greedy Forward Routing and Face Routing which are the pillars of geographical routing.

This article proposes a platform to obtain the performance of the geographic routing protocol that uses distance as a criterion for wireless communication networks. The platform allows to generate N nodes and obtain their physical coordinates of each one.

Simulation performed on the Matlab platform is developed considering as the physical layer behavior and the data link layer using CSMA / CA of the 802.15.4 standard and provides network performance by evaluating 2 transmissions with different source nodes.

*Index Terms* -. *Geographic routing, distance, GPSR, CSMA/CA.*

## 1. Introduction

Geographical routing, also called position-based routing, allows you to find routes from a source node (S) to a destination node (D) taking as criterion the distance that exists between the nodes of the network, the main geographical routes are Greedy Forward Routing and Face Routing [1].

### A. IEEE Standard 802.15.4.

The IEEE 802.15.4 standard is defined in the Physical layer and the data link layer in personal area wireless networks with low data transmission rates (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN). The physical layer is responsible for the transmission and reception of data using a specific radio channel and according to a specific modulation and diffusion technique. IEEE 802.15.4 offers three operational frequency bands: 2.4 GHz, 915 MHz and 868 MHz. The protocol also allows dynamic channel selection, a scan function that traverses a list of compatible channels for a beacon, detection of receiver power, indication of link quality and channel change. The MAC sublayer of the IEEE 802.15.4 protocol provides an interface between the physical layer and the upper layer protocols of LR-WPANs. The MAC sublayer of the IEEE 802.15.4 protocol uses CSMA / CA (Multiple access by carrier detection / containment avoidance) as a channel access protocol, the support of contention-free and contention-based periods, is characterized by adapting to the LR-WPAN requirements since, for example, it eliminates the RTS / CTS mechanism (used in IEEE 802.11) to reduce the probability of collisions, due to collisions are less likely to occur in low-speed networks. The MAC sublayer of the IEEE 802.15.4 protocol supports two operating modes that can be selected by the coordinator that are slotted and not slotted, in this work the non-slotted mode was used because the approach is a decentralized network.

The Fig. 1 shows a flow chart that describes the working mechanism of the CSMA / CA Unslotted.

The Unslotted CSMA/CA mechanism uses two variables to schedule the access to the medium:

- NB is the number of times the CSMA/CA algorithm was required to back off while attempting the access to the current channel. This value is initialized to zero before each new transmission attempt.
- BE is the back off exponent, which is related to how many back off period a device must wait before attempting to assess the channel activity.

The Unslotted CSMA / CA can be summarized in five steps:

- Step 1: Initialization of NB and Be, NB is initialized to 0 and the back off period exponent BE is set to the minimum value of 3. After initialization, the algorithm locates the limit of the next back off period.
- Step 2: Random wait delay to avoid collisions: the algorithm tries to avoid the collision by waiting for a given delay generated randomly in the range of periods  $[0, 2^{BE-1}]$  back off periods.
- Step 3: Clear Channel Assessment (CCA). The CCA should start at a limit of a back off period just after the expiration of the delay timer. If the channel is detected in a busy state, the algorithm goes to step 4, otherwise, that is, the channel is inactive, the algorithm goes to step 5.
- Step 4: Busy channel. if the channel is considered busy, the values of NB and BE are increased by one. However, BE can not exceed MaxBE, which is a constant defined in the standard, and with a default value equal to 5. If the number of retries exceeds macMaxCSMABackoffs, whose default value is 5, the algorithm ends with a failure state of access to the channel, otherwise, that is, the number of retries is less than or equal to macMaxCSMABackoffs, the algorithm returns to step 2.
- Step 5: The MAC sublayer immediately begins transmitting its current frame just after the CCA procedure evaluates that the channel is inactive.

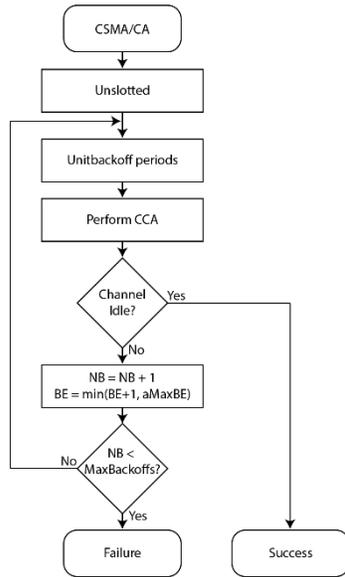


Fig. 1 CSMA/CA Unslotted

### B. Calculations.

The maximum performance is calculated by dividing the number of bits in a packet by the time it takes to transmit the packet.

The delay of a packet is determined. This global delay explains, on the one hand, the delay of the data that is sent and, on the other hand, the delay caused by all the elements of the sequence of frames, as shown in Fig.2 [10].

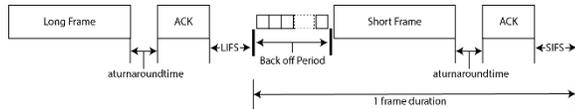


Fig. 2 Frame sequence in 802.15.4

The delay experienced by each package can be formulated as:

$$delay(x) = T_{BO} + T_{frame}(x) + T_{TA} + T_{ACK} + T_{IFS}(x) \quad (1)$$

Where

- $T_{BO}$  = Back off period
- $T_{frame}(x)$  = Transmission time for a payload of x byte
- $T_{TA}$  = Turn around time (192μs)
- $T_{ACK}$  = Transmission time for an ACK
- $T_{IFS}$  = IFS time

The Inter Frame Spacing (IFS) period defines the amount of time that separates the transmission of two consecutive frames. In fact, the MAC sub-layer needs a finite amount of time to process data received by the physical layer. The IFS time varies between Short Inter Frame Spacing (SIFS) or Long Inter Frame Spacing (LIFS) depending on the MAC Protocol Data Unit (MPDU), when the MPDU is less than or equal to 18 bytes,

SIFS is used, when it is greater than 18, LIFS is used. (SIFS = 192μs, LIFS = 640μs).

The back off period is defined as:

$$T_{BO} = BO_{slots} \cdot T_{BOslot} \quad (2)$$

$$BO_{slots} = [0, 2^{BE-1}]$$

$$T_{BOslot} = \text{Tiempo para back off slot (320μs)}$$

The time of transmission of a frame with a payload of x bytes is given by:

$$T_{frame}(x) = 8 \cdot \frac{Data}{R_{data}} \quad (3)$$

Where,

$$Data = \frac{L_{PHY} + L_{MAC\_HDR} + L_{address} + x + L_{MAC\_FTR}}{R_{data}} \quad (4)$$

$L_{PHY}$  Length of the PHY and synchronization header (6 bytes)

$L_{MAC\_HDR}$  = Length of the MAC header (3 bytes)

$L_{address}$  = Length of the information field of the MAC address using 64 bits (20 bytes)

$L_{MAC\_FTR}$  = Length of the MAC footer (2 bytes)

$R_{data}$  = Raw data rate (250 kbps)

x = Maximum payload length (102 bytes)

The transmission time for an ACK is:

$$T_{ACK} = \frac{L_{PHY} + L_{MAC\_HDR} + L_{MAC\_FTR}}{R_{data}}$$

### C. Greedy Forward Routing.

Greedy Forward is a very simple routing algorithm but one of the most powerful [3]. It can be determined in 3 steps, first step (S) obtains the coordinates of (D) and the distance that exists between them, second step generates a broadcast to know its neighboring nodes (N) and obtain its physical coordinates, third step compares the distances from N to D and selects the one with the least distance and that is less than the distance between O and D, the following node returns to perform these steps until D is reached.

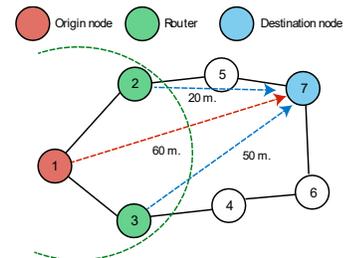


Fig. 3 Greedy Forward Routing

The fundamental advantage of Greedy Forwarding is that you only need to know the immediate neighbors for the shipment. In multi-hop networks the number of neighbors within the range is substantially less than the total number of nodes in the network. This advantage is also a drawback: there are network topologies in which the only route to reach the destination requires that the packet be moved temporarily to a node farther from the destination geographically [2].

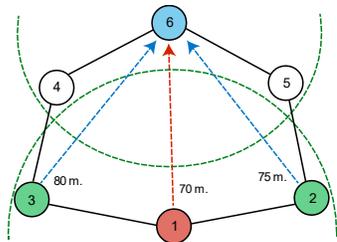


Fig. 4 Routing failure.

The node "1" receives a packet whose destination is the node "6". The distance between node "1" and node "6" is presented. Although there are two possible paths to reach the destination ("1-3-4-6" and "1-2-5-6"), the algorithm will not forward the packet because the distance between "6" and the nodes "2" and "3" is greater than the distance between the destination and node "1", that is, node "1" is a local minimum due to its proximity to node "6".

D. Face Routing.

Unlike the Greedy Forward Routing, the Face Routing itself can be guaranteed in a flat graphic built with several existing methods. There is different routing of faces, they differ mainly in the decision about when and which face to traverse next [1]. In traditional Face Routing it is based on the rule of the right hand, the source node (S) generates a straight line towards the destination node (D) and routes the information towards the link in favor of the hands of the clock, each node will carry out the same action without taking into account the links that cut to the straight line between the O and D, will be repeated until the information reaches D.

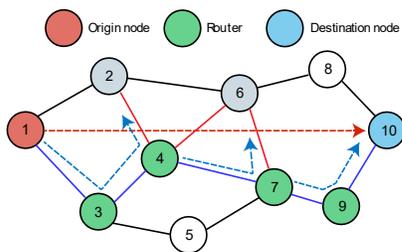


Fig. 5 Face Routing.

E. Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR).

Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) consists of the combination of two methods for the forwarding of packages: Greedy Forwarding, which is used whenever possible, and Face Routing, which is used in regions where Greedy Forwarding can not be used.

It can be observed in the previously seen routing and other variants such as [5], [6], [7], that the routing begins with the knowledge of the coordinates of D, however actually it is necessary to perform certain tasks to obtain these data. For as for example in [4] the network decrees a node as a sink node, this node is in charge of obtaining the physical coordinates of all the nodes of the network, it can be done with a broadcast of the network.

2. Platform

A. Discrete Events simulation.

A Monte Carlo Simulation was developed using the Matlab software that allows to generate N nodes within a specific area and observe their interactions, providing the topology of the network and the performance of the proposed routing, in the Fig.6 shows the general algorithm of the simulation.

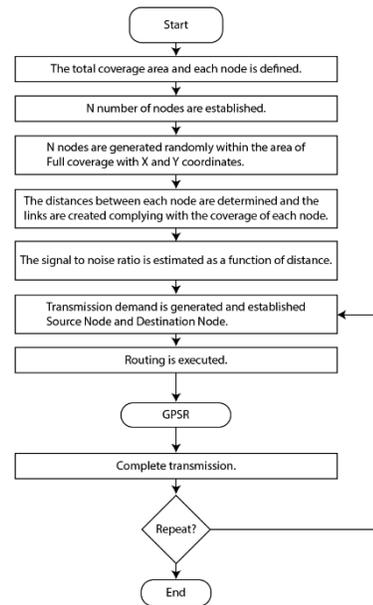


Fig. 6 GPSR flow diagram.

The platform has the following characteristics:

- Area: Generates a square-shaped area of variable size that limits the network.
- Nodes: Generates "N" number of nodes randomly with "X" and "Y" coordinates.

- Coverage: It allows to vary the coverage of the nodes and the discovery of the topology of the network.

Our network establishes 4 types of nodes: Source Node (S), Router, Destination Node (D) and Nodes Sinks.

- Source Node: Origin Node where the transmission is requested.
- Router: Allows retransmit the information, generating a path between the S and D.
- Node Destination: Node where the information is directed.
- Sink Node: Node that stores the information of the network.

The simulation was performed considering next parameters.

- Area: 100 m<sup>2</sup>
- Nodes: 100 elements.
- Coverage: 20 m

For simulation purposes, Interferent nodes were generated randomly and with a variable amount of 20, 30 and 40% of the total, each amount was evaluated as a case, in each case the probability of transmission was varied by 40, 60 and 80% of the interferent nodes.

The performance of our network is determined by the number of bits received between the period of time elapsed for delivery. The physical layer and access layer of the 802.15.4 standard was simulated using the equations of [10].

### 3. Conclusion

The results obtained from the simulation are shown, in Fig.7. We can see the complete network of 100 nodes in an area of 100 m<sup>2</sup> Fig.8 shows the route between a source node and the destination node.

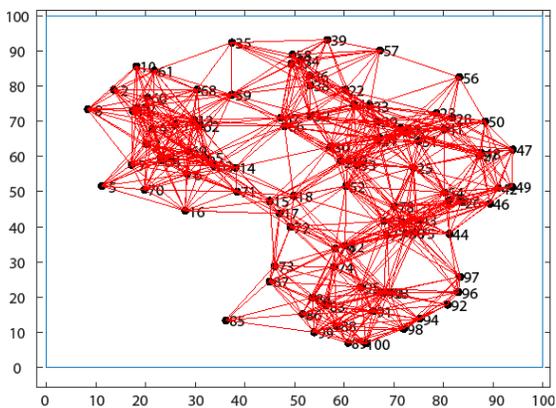


Fig. 7 Complete network.

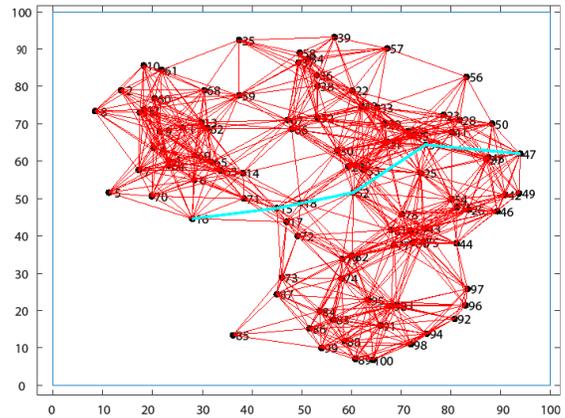


Fig. 8 Routing.

Fig.9 shows the delays obtained when carrying out the routing proposal, generating 2 simultaneous transmissions (T1 and T2) with origin nodes and destination nodes determined with randomly and different origin nodes.

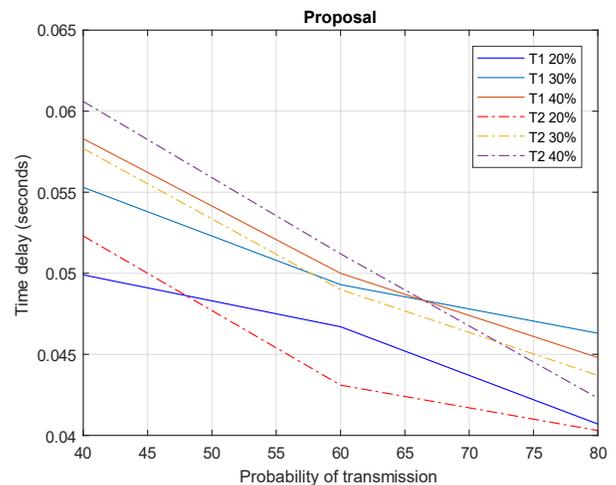


Fig. 9 Network performance.

It can be observed when joining the Face Routing and Greedy Forwarding that it is possible to guarantee a route while the origin node and the destination node are within the network. It only is taken as a criterion the distance between the nodes, the routes are completely different as we can see in the variants T1 and T2 of each case. It is observed how the delay increases when the number of interference nodes increases too. When they have a 40% probability of transmission, starts the highest delays. However, as the probability of transmission increases, the delay decreases abruptly.

### 4. Referencias

- [1] Yujun Li, Yaling Yang, and Xianliang Lu. Rules of Designing Routing Metrics for Greedy,Face, and Combined Greedy-Face Routing.
- [2] Brad Karp, H. T. Kung. GPCR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks.

- [3] Laxmi P Gewali and Umang Amatya. Node Filtering and Face Routing for Sensor Network.
- [4] Ashish Nanda, Priyadarsi Nanda and Xiangjian He. Geo-Location Oriented Routing Protocol for Smart Dynamic Mesh Network.
- [5] Prosenjit Bose, Pat Morin, Ivan Stojmenovic, and Jorge Urrutia. Routing with guaranteed delivery in ad hoc wireless networks.
- [6] Evangelos Kranakis, Harvinder Singh, and Jorge Urrutia. Compass routing on geometric networks.
- [7] Fabian Kuhn, Roger Wattenhofer, Yan Zhang, and Aaron Zollinger. Geometric ad-hoc routing: Of theory and practice.
- [8] Fraser Cadger, Member, IEEE, Kevin Curran, Senior Fellow, IEEE, Jose Santos, and Sandra Moffett. A Survey of Geographical Routing in Wireless Ad-Hoc Networks.
- [9] Sui Tao, Liu Xiuzhi, Wang Yanyan, Chong Yanli, Cheng Dayin. A matlab simulation of the Kruskal algorithm for erecting communication network. ©2011 IEEE.
- [10] Benoit Latre1., Pieter De Mill, Ingrid Moerman, Niek Van Dierdonck, Bart Dhoedt, and Piet Demeester. Maximum Throughput and Minimum Delay in IEEE 802.15.4.
- [11] Anis Koubâa, Mário Alves, Eduardo Tovar. IEEE 802.15.4 for Wireless Sensor Networks: A Technical Overview. Technical Report.

## 5. Biografías

**José Luis Sánchez Chacón** was born in Tamaulipas, Mexico in 1992. He obtained his electronic engineer degree from the Instituto Tecnológico de Ciudad Madero in 2015. Currently he is studying the Master in Electronic Engineering at the Benémerita Autonoma Universidad de Puebla.

**Josefina Castañeda-Camacho** (S'99) was born in Puebla, Mexico, in 1973. She received the B.Sc. degree in electrical engineering from the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), in 1999, and the M.Sc. and Ph.D. degrees in electrical engineering from the Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). Instituto Politécnico Nacional, Mexico City, Mexico, in 2000 and 2007, respectively. She is currently working in BUAP where she is professor and researcher. Her main research interests include teletraffic analysis, cellular system dimensioning, and performance modeling and evaluation of overlaid systems and packet network.

**José Miguel Hurtado Madrid** was born in the city of Teziutlán; Puebla in 1987, he graduated from the Bachelor of Electronics Sciences in the Faculty of Electronics Sciences of the Benémerita Autonoma Universidad de Puebla (BUAP) in 2010, in 2013 he obtained the Master's Degree in Electronic Engineering in the faculty of Electronic Sciences, currently a research professor in the Faculty of Computer Science at the BUAP, as well as a catechumenate in the master's degree

in Embedded Systems Engineering from BUAP, his research area is the design of Embedded Systems, digital systems and harvard computer architectures.

**Liliana Cortez** was born in Kiev, Ukraine in 1962; she made studies of Electrical Engineering and Masters of Sciences in power stations Polytechnical Institute of Kiev, Ukraine and Ph.D in Technical Sciences in the Polytechnical State University of Saint Petersburg, Russia. At the moment it works as titular professor in the Faculty of Sciences of the Electronics of the Universidad Autonoma de Puebla, Mexico.

**Marcelino Luis Guadalupe** was born in Veracruz, Mexico in 1992. He obtained his electronic engineer degree from the Instituto Tecnológico de Ciudad Madero in 2015. Currently he is studying the Master in Electronic Engineering at the Benémerita Autonoma Universidad de Puebla. Working on the communication field, specifically in the automotive communication networks with CAN and LIN bus.

# Ontología informática y gestión de conocimiento en la empresa de investigación mexicana.

A. Sánchez Ramírez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Jubilado ex empleado de CIATEQ.*

*as76670@gmail.com*

**Resumen**— Compartir y reutilizar la información es fundamental para el éxito en una organización de investigación, tanto pública como privada. Sin embargo existe poca literatura que engloba las actividades sistémicas para gestión de información y conocimiento en México.

El objetivo y resultado de las conclusiones es delinear como cada uno de los elementos analizados en esta aproximación literaria pueden conformar un marco ontológico apoyado en las tecnologías de información y comunicación, que ayudan a integrar las actividades organizacionales, expresión de habilidades y competencias en la relación de utilización y consumo de información que se comparte y reutiliza, añadiendo valor agregado en la innovación y creatividad, desde una perspectiva teórica.

*Palabras Clave: Gestión de conocimiento, investigación, tecnología de información y comunicación.*

## 1. Introducción

La empresa de investigación tanto pública como privada en México puede fortalecer su valor agregado con la inclusión de ontologías para la administración de conocimiento sistémico. Es un tema novedoso ya que no existe literatura en la actualidad para la creatividad e innovación [1], debe integrar conocimiento diseminado y separado en las bases de conocimiento (Bdd) internas contenidas por los diferentes agentes en recursos humanos, administración de proyectos, publicaciones técnicas y propiedad intelectual.

El principio de la gestión del conocimiento en un centro de investigación debe ser enfocado hacia un entorno de participación apoyado por las tecnologías de información y comunicación que ayude a fusionar el conocimiento contenido en las corrientes internas y externas de la firma que facilite la actividad de investigación al suministrar un acceso a los documentos y resultados de las investigaciones realizadas que pueden incorporarse en: las publicaciones, prototipos o en los objetos de propiedad intelectual desarrollados. Pero también los productos del conocimiento anteriores dependen de la reserva de competencias y habilidades técnicas contenidas en la experiencia de los investigadores que se incorpora en un archivo que las captura y controla en forma de: conocimiento de los empleados, procesos, productos o servicios y otros.

La gestión del conocimiento ha sido conceptualizada como la interacción entre repositorios de conocimiento, agentes y contexto relacionada con tres familias que integran: una tecnología informática para la identificación, captura, almacenamiento, mantenimiento organización y descubrimiento de los repositorios del conocimiento organizacional; los procesos de negocio que contienen el material de instrucción, la experiencia de los empleados, tareas, actividades, roles y recursos –partes, materia prima, trabajadores, o equipos-, que al ponerse en acción se comparten y se reutilizan continuamente para generar productos y servicios [2], que son capitalizados en los activos intangibles, los productos, clientes, proveedores; y como una estrategia que se transforma en un plan que desemboca hacia el universo de valores del contexto organizacional contenidos en los capitales del conocimiento que agregan valor [3].

Gestión del conocimiento es también una disciplina que considera el conocimiento como el más importante recurso organizacional y como una estrategia cuyo objetivo es reunir, administrar, y poner el conocimiento en acción, de forma que circule y se desarrolle continuamente [4]. Administrar y difundir un capital de conocimiento organizacional determina la innovación de los productos, procesos, modelos organizacionales y dan respuestas a los consumidores que buscan mejorar su posición competitiva. Esta clase de conocimiento se preocupa por la creatividad, la solución de problemas, la disposición al diálogo, administración incierta y sensibilidad por el contexto cultural en el que opera la organización [5].

## 2. Proceso ontológico

### 2.1 Parcelas de Conocimiento

Una característica general en la mayoría de las empresas, incluyendo la investigación es la gestión del poder por la vía de información; cada agente particular administra un archivo personal al restringirlo o no compartirlo con el resto de los individuos, lo que, desperdicia físicamente la capacidad de creatividad y toma de decisiones, al no utilizar los artefactos, documentos de proyecto, publicaciones, cultura, comunidades de práctica de forma eficiente. Entonces para que la gestión de

conocimiento sea efectiva, la información debería fluir hacia el exterior alimentando a clientes, proveedores, partes interesadas y órganos de gobierno, como también hacia el interior propagando la información en los procesos organizacionales que se incorporan en producción, abastecimientos, investigación, finanzas, manufactura de manera que permita o facilite la fusión de la información con la interacción de los procesos de la empresa que incorporan con las actividades entre los empleados.

Los procesos como parte de la actividad productiva integran las tareas individuales de los trabajadores [6], éstas a su vez se agrupan en conjuntos de tareas, que consecutivamente se transforman en actividades temporales [7], a través de los procesos que convierten los insumos en productos de valor para el cliente.

El valor agregado es la resultante de todas las interacciones que se dan entre los clientes, proveedores, accionistas, partes interesadas con los recursos humanos, financieros y materiales que se desarrollan dentro de los procesos que comparten y reutilizan los conocimientos de la empresa a través del tiempo, los que dan como resultado los productos y servicios diferenciadores que producen una ventaja competitiva [8]. Estas interacciones generan a su vez un enlace de valor que se traduce en innovación con la aportación de las universidades, industria, gobierno y centros de investigación, que son guiados por las necesidades de mercado que se conjugan con un conocimiento científico que tiene la obligación de satisfacer las necesidades sociales del contexto en que se desenvuelven.

Dichos procesos generan innovación al incorporar las fases de investigación, desarrollo e implementación dentro de objetos del conocimiento que resultan de las actividades innovadoras de los investigadores y que son incorporados en las: publicaciones técnicas, los prototipos desarrollados y lo más importante es su utilización y puesta en práctica en función de resolver las necesidades sociales.

Pero en la realidad lo antes descrito se presenta de manera diferente ya que el conocimiento generalmente se encuentra disperso, contenido en diferentes repositorios que inclusive están bajo el control de las personas y no son ni siquiera compartidos entre ellas, lo que aumenta el grado de dificultad para lograr un seguimiento sistémico de los repositorios de información y los documentos de la empresa; es aquí donde la inteligencia de negocios aporta su valor agregado al permitir el acceso centralizado a los repositorios de conocimiento facilitando su reutilización y puede automatizar operativamente las tareas encomendadas a las funciones de aseguramiento de la calidad en beneficio del cliente.

## **2.2 Administración de conocimiento y su catálisis con las tecnologías de información y comunicación.**

La inteligencia de negocio captura el conocimiento de los agentes para que otros tengan la capacidad de acceso requerida, la forma de lograrlo es apuntar hacia esas tecnologías que capitalizan la web, almacén de datos, sistemas documentales, servidores de aplicaciones que suministran los elementos materiales físicos, virtuales (hardware, software) para constituir una ontología que se despliega al compartir, reusar el conocimiento disponible, y permiten manejar una enorme cantidad de datos que al ser ordenados como metadatos conectan las tareas, actividades, con los procesos, mediante las categorías correspondientes, para fortalecer las comunidades de práctica.

Estos conceptos se categorizan en los repositorios del producto y los documentos, las personas que dan origen a las comunidades de práctica (CoP), áreas de investigación, proyectos, procesos de negocio, servicios semánticos web, dominios y estructuras organizacionales. De aquí se deriva que la identificación de las fuentes de información y las actividades del negocio se convierten en pilares fundamentales. La resultante es no sólo construir un esquema de repositorios para almacenar metadatos, sino la comunicación entre un conjunto de fuentes documentales de conocimiento que por medio de una secuencia de reglas que se procesan en las computadoras, son entendidas por los agentes de la empresa, lo que permite simultáneamente su búsqueda y recuperación; permite a su vez construir un lenguaje común, interconexión entre las diferentes plataformas, con un mecanismo básico de búsqueda y recuperación de información que facilita el acceso, personalización, publicación y búsqueda

El dominio ontológico relativo a un centro de investigación y desarrollo mexicano esta principalmente conformado por las actividades de: redes de monitoreo y control, telecomunicaciones, medición de fluidos y transformación del plástico. Este dominio produce valor agregado sólo en la medida en que cada uno de los actores se comunica e interactúa sistémicamente, lo que permite a su vez potenciar los procesos para compartir y reutilizar sus conocimientos, dentro de una espiral ontológica y epistemológica entre el conocimiento tácito y explícito [9]. Para que esto suceda en el centro de tecnología mexicano es necesario disponer los medios para que el investigador comunique sus ideas o su conocimiento tácito hacia otro que lo necesita, como mínimo, en función de implementar mejoras e innovación dentro de su dominio ontológico interior; una vez que esto sucede el efecto se extiende hacia tres o más investigadores, formando así una comunidad de práctica, que con el tiempo se difunde e integra con las corrientes externas de la firma. Dentro de ambiente rico

en conocimiento que rodea los procesos de negocio la gente se enfrenta con sus tareas complejas dentro de una comunicación e intercambio de conocimiento tácito que busca nuevas formas innovadoras, pragmáticas y empiezan a comportarse más socialmente generando las comunidades de práctica [10] con un ambiente de confianza en donde sus miembros aprenden a compartir y comprender el conocimiento tácito de otros, por la vía de los relatos, diálogos y reuniones de trabajo tanto formales como informales.

Entonces debido a la alta complejidad que se genera por las múltiples comunicaciones e interacciones entre los flujos de conocimiento en estas comunidades de práctica integradas, se realzan o transforman las experiencias incorporadas a estímulos sensoriales, en forma de relaciones integradas al mundo viviente en que los actores organizacionales participan del conocimiento, comprenden como se interpreta o se lee la tecnología en unas relaciones hermenéuticas y un lazo ontológico [11].

Así actores sociales a expresan su profundo conocimiento y la técnica de una manera simple, clara y con sentido común, con referencia al contexto en que el conocimiento se desarrolla y aplica, de manera que se puede fácilmente capturar y compartir con otros. Así se convierte en un medio que ayuda a comprender las relaciones del todo y sus partes por la vía de un lazo hermenéutico del entendimiento que liga los objetivos del negocio hacia los recursos del conocimiento [12]. Sin embargo el entendimiento que se obtiene al ejercer dicha relación no es de ninguna forma perfecto, es más bien un entendimiento temporal que se efectúa dentro de una amalgama de fronteras [13]; que sugiere que el entendimiento de ciertos fenómenos se determina permanentemente por un movimiento de anticipación o entendimiento temprano. Pero cuando se inicia como un prejuicio o conocimiento posterior, la interpretación del fenómeno se inicia al examinar sus partes constitutivas. No obstante el entendimiento de los componentes del fenómeno se hace únicamente cuando sus relaciones y el todo se han determinado. La determinación de las relaciones contextuales se guía, mediante la expectativa del significado que nace del contexto precedente derivado de los prejuicios o las tradiciones.

Entonces la tecnología está imbuida en una relación con la interacción humana, en donde la filosofía de la tecnología ayuda al entendimiento para que las tecnologías de información y comunicación se diseñen bajo el principio que realza y transforma las experiencias de los actores sociales en su mundo empresarial, que mejora la manera en que se interpretan o se relacionan las tecnologías [14]. El enfoque desde otra dimensión muestra que el propósito es servir al usuario, actor o investigador, pero no utilizar una tecnología específica sólo

como un objeto elegante de programación [15]; es construir interacciones sociales entre humanos con mediación de la tecnología informática, en lugar de sólo interacciones entre humanos-computadoras [16].

### **2.3 Ontología informática y gestión de conocimiento.**

Un medio efectivo para modificar gradualmente y dar paso a una nueva cultura de trabajo se incorpora en los instrumentos informáticos disponibles que a su vez son útiles para el desarrollo de investigación científica a nivel social, en una estrategia que plantea preguntas, cuando el investigador no puede influir sobre los eventos circundantes de los acontecimientos de la vida real del entramado organizacional [17] y que envuelven una variedad de fuentes de información ricas en contexto [18], en ambientes pedagógicos que utilizan las narrativas en los procesos de negocio para cada uno de los estratos empresariales, que simultáneamente se enriquecen con los relatos individuales registrados en sus anotaciones correspondientes.

El entendimiento de los esquemas previos son un pilar fundamental para que se cambie la cultura hacia la concepción, apropiación y explotación de los conocimientos; como una oportunidad de mejora para cambiar la actitud del investigador hacia una apertura y aceptación más abierta hacia el registro explícito de sus experiencias que tienen el potencial de asistir a los otros actores que las necesitan para poder incorporarlas dentro de su mundo diario de actividades en su búsqueda de nuevas soluciones y nuevas maneras de hacer sus tareas. Para alcanzar este desafío se requiere:

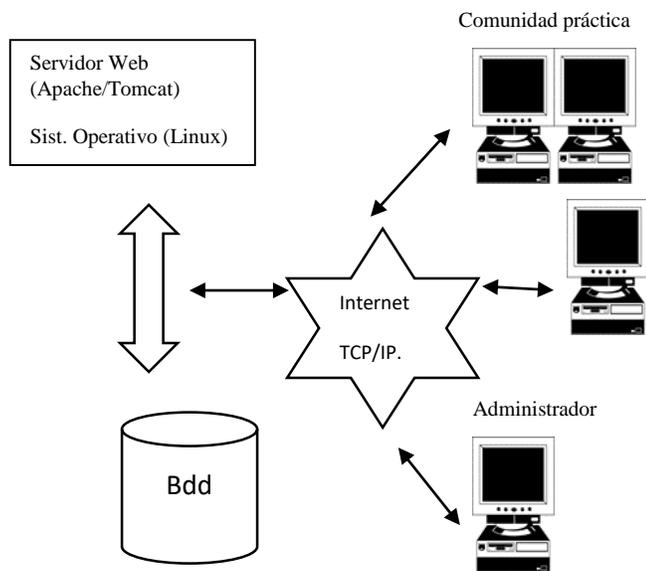
- Entablar comunicación de un investigador cualquiera hacia otro diferente de forma que puedan consultar recíprocamente sus repositorios personales
- Permitir al investigador compartir explícitamente sus experiencias vividas en forma de averías o lecciones aprendidas incluyendo su interpretación personal que se añaden a su base de datos
- Mostrar de manera individual los objetos de conocimiento incorporados en sus prototipos, publicaciones y propiedad intelectual generada
- Hacer viable la conectividad de cualquier investigador con cualquiera de los otros actores de la compañía, de manera que el conocimiento implícito o explícito sea reutilizable
- Conexión vía Web Internet para el acceso, transferencia y fusión del conocimiento hacia los investigadores que se encuentran geográficamente aislados.

**TABLA 1. CATEGORÍAS ONTOLÓGICAS**

<u>Enfoque</u>	<u>Principio</u>	<u>Categoría</u>	<u>Implicación de diseño futuro</u>	<u>Objeto de discurso</u>
<b>Persona</b>	Lecciones aprendidas	Portal Web Internet	Comunicar nuevas formas de trabajo sin <i>parcelas de conocimiento</i>	Cambio cultural
<b>Grupo</b>	Flujo conocimiento	Comunidades de práctica	Realzar habilidades técnicas	Grupo de práctica
<b>cliente</b>	Interacciones productivas	Acceso a los productos y objetos de conocimiento	Asegurar que el <i>objeto de conocimiento</i> está disponible	Propiedad intelectual

La tabla 1, muestra los cursos de acción u objetos de discurso durante su utilización por los investigadores [19].

La fig. 1 describe la estructura que integra las características enunciadas anteriormente resaltando de manera especial el lazo ontológico que añade los elementos requeridos para un lazo de espiral ontológica y epistemológica con potencial de generar creatividad e innovación, además de un lazo de retroalimentación integrado entre los actores en el que el conocimiento organizacional se incorporada no sólo en lo individual cognitivo, sino también en las prácticas colectivas y las culturas, en la interacción entre los actores y los efectos de su interacción con los artefactos o herramientas informáticas [20].



**Fig. 1. Estructura ontológica informática**

## 2.4 Limitaciones

Sin embargo también los usuarios perciben que la cultura de no registrar los eventos importantes que ocurren en las actividades laborales es un factor que limitante, lo que requiere un análisis futuro. Ya que los actores que participan en los procesos de negocio pueden formar una comunidad que implica un enorme interés en compartir sus experiencias dentro de un esfuerzo común para encontrar soluciones prácticas por medio del aprendizaje en una cultura de práctica [21]; donde el compartir y generar conocimiento se transforma en un proceso continuo en que todo es sujeto a revisiones y cuestionamientos.

## 3. Conclusiones

El fortalecimiento de la creatividad e innovación en la empresa de investigación se verá incrementado al dar el poder y facilitar la disposición del conocimiento disperso, aislado de los diferentes actores organizacionales, que se extiende hacia las otras comunidades o grupos de interés internos o externos.

Entonces la gestión del conocimiento que alcance una inteligencia de negocio eficiente sólo se alcanza mediante la utilización de artefactos, documentos de proyecto, publicaciones, cultura, comunidad, propiedad intelectual y la toma de decisiones.

La integración de la información (datos) y su consecuente transformación en metadatos que soportan el conocimiento, se alcanza cuando se dispone eficientemente de las tecnologías web, almacén de datos, sistemas documentales, servidor de aplicaciones que a su vez proveen los sistemas, materiales físicos, virtuales (hardware, software) en una ontología que comparte y reutiliza el conocimiento.

Como conclusión final se observa que cada uno de los elementos analizados en esta aproximación literaria conforma el marco ontológico que puntualiza y concreta el objetivo establecido.

## 4. Referencias

- [1] Derich S. et al. (2004). Knowledge Management as enabling R&D innovation in high tech industry: the case of SAIT. Journal of Knowledge Management, 8(6), pp. 4-16.
- [2] Rolland C. et al. (1999). Enterprise knowledge development: the process view. Information and Management, Nbr. 36, pp. 164-185
- [3] Carrillo F. J. (1999). Three families of KM approaches. México. México. fjcarrillo@itesm.mx
- [4] Heidegger M. 2016. Ontología, hermenéutica de la facticidad. Ed. Alianza, pp. 23-27.
- [5] Castelfranchi C. (2004). Trust mediation in KM and sharing. CD Jensen (Ed.), iTrust 2004, LNCS 2995, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp-304-318

- [6] Melan E. (1992). Process Management. Mac Graw Hill. NY
- [7] Fingar P. et al. (2002). Business Processes Management. Tampa. Meghan-Kiffer Press
- [8] Goh A. (2005). Harnessing knowledge for innovation: an integrated management framework. Journal of KM, 9(4), pp. 5-19
- [9] Nonaka I. et al. (1995). The knowledge creating company. Oxford University.
- [10] Lave J. (1988). Cognition in practice. Cambridge University Press.
- [11] Tiwana A. (2002). Knowledge management Toolkit. Practical Techniques for building a knowledge Management System. Prentice Hall.
- [12] Malone T et al. (1994). The interdisciplinary study of coordination. ACM computing surveys (26) 1, pp. 87-97
- [13] Heidegger M. (1976). Being and time. Harper and Row. NY. US
- [14] Ihde D. (1990). Technology and the lifeworld. Indiana University Press. Indianapolis USA.
- [15] Norman D. A. et al. (1986). Cognitive engineering in user centered systems design. Norman and Drapper Ed. Lawrence Erlbaum Associates Ing. Hillsdale, New Jersey, USA
- [16] DePaula R. (2003). A new era in human computer interaction: the challenges of technology as a social proxy. In Proceedings of the CLICH 2003- Building bridges among individuals and communities, pp. 219-222. Rio de Janeiro, Brazil
- [17] Yin R. (2003). Case study research design and methods. Sage publications Ltd. London
- [18] Creswell J. (1998). Qualitative inquiry and research design: choosing among five traditions. Sage Publications Ltd, London
- [19] Davenport E. et al. (2006). Initiating e-Participation through a knowledge working network. IFIP, volume 226. Boston Springer, pp. 96-108
- [20] Pentland B. (1995). Information systems and organizational learning: the social epistemology of organizational knowledge systems. Accounting Management and Information technology, 5:1, pp. 1-22
- [21] Wenger et al. (1991). Situated learning. Legitimate peripheral participation. Cambridge University Press

## 5. Biografías

Dr. Antonio Sánchez Ramírez  
 Ingeniero mecánico electricista por el ITESO. Doctorado Sociedad de información y conocimiento por UPSAM, España.

# Desarrollo inicial del modelo de formación dual universitario de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes

G. Brianza<sup>1, a</sup>, F. A. Villa<sup>1, b</sup>, C. I. Rodríguez<sup>2, c</sup>, J. E. Luévano<sup>3, d</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Área de electromecánica Industrial y Energías

<sup>a</sup> gerardo.brinanza@utags.edu.mx, <sup>b</sup> villa@utags.edu.mx, <sup>c</sup> crodriguez@utags.edu.mx, <sup>d</sup> jluevano@utags.edu.mx

**Resumen**—El presente trabajo pretende mostrar el Desarrollo del Programa Dual Universitario con base en las características del Modelo Alemán, Duale Hochschule Lateinamerika (DHLA®) y las experiencias de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes (UTA) en el Programa de Ingeniería Mecatrónica y el sector industrial. Se muestran los avances del primer grupo de estudiantes denominados colaboradores de la empresa, su desarrollo académico en las aulas y la industria, la actitud y adaptación a los cambios, así como las expectativas del sector industrial como resultado de la primera estancia de colaboración dual, alineando e integrando a las competencias profesionales que llevan al estudiante a desarrollar actividades laborales y académicas de manera alternada, en una empresa e institución educativa, además, se analizan factores de éxito y sus compromisos.

*Palabras clave.* Modelo dual, sector industrial, Universidad.

## Introducción.

El modelo de aprendizaje dual combina el aprendizaje teórico en la escuela con la práctica en una empresa, a fin de potenciar las habilidades de los jóvenes universitarios colaborando con la industria a fin de lograr responder a las necesidades empresariales y, a la vez, asegurar su propia empleabilidad [1].

El sistema ha probado ser exitoso en los países como Alemania donde germino dentro de un proceso histórico-cultural de más de cien años. “El modelo exige la construcción de una adecuada relación entre la escuela y la empresa” [2], una planeación estratégica bien estructurada a fin de garantizar tanto la oferta como la calidad de la formación [3], se debe tomar en cuenta la importancia de la involucración y participación de los interlocutores sociales, lo que conduce a soportar su recepción en el ámbito local, nacional así como en otros países.

El modelo educativo de formación dual surge precisamente con la intención de dotar a los estudiantes desde el inicio de su formación como universitarios con conocimientos y habilidades que satisfagan la planta productiva han sido seleccionados por ellos con la confianza de que obtendrán personal altamente capacitado.

Después de la Segunda Guerra Mundial, el modelo de formación dual tiene su origen en Alemania, sus raíces se remontan a la época medieval donde los oficios se aprendían con los gremios artesanos. “Posteriormente, se consolida durante el periodo de industrialización, certificado por el Estado para finalmente insertarse en el marco legislativo bajo la Ley de Formación y Educación Profesional” [2] denominado

Ley de formación profesional (Berufsbildungsgesetz) en 1969 [4]. “El éxito de este modelo en Alemania a la evolución donde, las empresas, cámaras de comercio y el Estado han logrado trabajar en conjunto para llegar a un acuerdo sobre lo que significa formación dual, su correcta ejecución y el compromiso que representa” [5].

El sistema dual de formación profesional alemán, Duale Hochschule Lateinamerika (DHLA®) es un modelo que está siendo importado hacia otros países, debido a que responde adecuadamente a las necesidades del entorno económico y posibilita la incorporación del alumnado al mercado de trabajo [6]. Además, supera a otros sistemas de carácter meramente escolar al favorecer una mejor adecuación en la evaluación y desarrollo de los aprendizajes profesionales a las necesidades del sector industrial facilitando una fácil y rápida adaptación a los cambios tecnológicos tan vertiginosos del mundo laboral actual; en este sentido es necesario indicar que los gobiernos que no estén dispuestos a implementar el sistema dual, tendrán que hacer una notable inversión de recursos tecnológicos a fin de lograr las expectativas en equipamiento que maneje al momento el mercado laboral dentro de los centros educativos, por el contrario con el modelo dual, la inversión en tecnología la hace la propia empresa, siendo altamente rentable ya que la recuperación de los gastos realizados son a través de la producción y su margen de utilidad.

## Motivos para participar en el modelo de formación dual.

Un aspecto importante por considerar es el motivo que impulsa a las empresas a participar en el modelo de formación dual. El modelo de formación dual proporciona a las empresas ventajas que van desde la reducción en los costos de reclutamiento y capacitación, hasta el aumento de la competitividad [7]. No obstante, y de acuerdo a Vormfelde (2017), el no establecer “necesidades reales de las empresas” se considera como un factor de riesgo para la implementación del modelo de formación dual. Es decir, las empresas deben de tener necesidades de contratación y capacitación de personal calificado, para que la inversión que realicen en los colaboradores durante su estancia en la empresa pueda ser aprovechada a mediano y largo plazo, una vez que estos sean contratados por la compañía como profesionistas.

El grado de consolidación que se dé entre los proyectos de colaboración escuela-empresa está directamente relacionado a los motivos iniciales que impulsan a las distintas partes a participar en estos nuevos modelos de formación. En el grado de madurez en las relaciones escuela-empresa es altamente deseable que los intereses sean recíprocos por ambos sectores, que garanticen un beneficio a todas las partes, la búsqueda de intereses particulares que sólo beneficien a las empresas puede afectar la consolidación de la vinculación y mermar su continuidad. Es importante destacar que, en la actualidad se prevé que un colaborador aprendiz podrá rotar y ocupar entre cuatro a cinco puestos de trabajo diferentes [8]. Se debe lograr comprender que una de las razones por las cuales las empresas reclutan aprendices es para disminuir los costos salariales, dado que estos mismo generan valor durante su estancia.

La tendencia de una economía globalizada actual exige mayor y mejor formación en competencias profesionales [9], que existan alianzas estratégicas de vinculación entre Empresarios, Universidades y Gobiernos Estatales que logren contribuir en fortalecer la calidad y la pertinencia de la educación superior [2]. En este contexto, la Coordinación General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas ha establecido el Modelo Educativo en Competencias Profesionales en Formación Dual y en Alternancia en las Universidades Tecnológicas, donde el estudiante aprendiz-trabajador realiza su proceso de enseñanza-aprendizaje de manera dual o alterna en la universidad y en la empresa para desarrollar aprendizajes de sus competencias y capacidades, poder ser evaluado y ser reconocido con el título de Ingeniero en Formación Dual o en Alternancia.

Es necesario garantizar que los planes y programas de estudio de Técnico Superior Universitario e ingeniería sean pertinentes, flexibles e innovadores para asegurar el éxito del estudiante en su trayectoria como colaborador y su empleabilidad en la empresa. La flexibilidad permite establecer los horarios y calendarios de actividades del aprendiz-trabajador a fin de cumplir con el programa educativo universitario y sus actividades formativas-laborales en la empresa [2]. Las competencias y experiencia adquiridos en su formación dual y en alternancia tienen como objetivo primordial el que sean una necesidad prioritaria incrementando sustancialmente la posibilidad de contratación en la empresa, con el fin de contribuir al desarrollo de sectores estratégicos del país, e impulsando modalidades de formación profesional acordes a las necesidades actuales de la sociedad.

### **La articulación educación-empleo y el desarrollo regional.**

Como ha sido mencionado, el modelo dual presenta una serie de beneficios [10]. Profesionistas jóvenes que egresan de

la educación superior con experiencia laboral, acostumbrados a las dinámicas empresariales, y con un título de competencias con el que no todos los profesionistas cuentan. Este modelo pretende lograr su participación como colaboradores, que de ser correctamente implementado generará a nivel regional un aumento de la productividad y desarrollo de la industria en la entidad.

La Universidad Tecnológica de Aguascalientes, es una institución cuya actividad principal se centra en formar Técnicos Superiores Universitarios e Ingenieros que puedan desarrollar y aplicar en forma práctica, Tecnologías, Metodologías y Herramientas que requiera el sector productivo [11].

La escolaridad promedio de la población en el estado es de 9.2 grados [12]. Con respecto al rezago educativo, según cifras de la Secretaría de Educación Pública [13], la población de 15 y más años con rezago corresponde a 29.5% de la población.

En cuanto a la educación superior, el 32.94% son los alumnos que deciden matricularse en áreas afines a la ingeniería, manufactura y construcción [14]. Con este respecto y considerando la demanda actual, resulta necesario fortalecer la vinculación escuela-empresa. En este aspecto, el impulso de la ciencia y tecnología juegan un papel importante [2]. La capacitación y formación para el trabajo requiere de una transformación profunda para convertir estas actividades en un compromiso mutuamente incluyente entre los centros universitarios, las empresas y el propio gobierno.

El Programa Nacional de Educación 2001-2006 ofrece una visión de la educación superior para el año 2025 tal que: La educación superior será palanca impulsora del desarrollo social, la democracia y convivencia multicultural [15].

Una de las características del sistema será su coordinación con los otros tipos educativos y con los ámbitos de la ciencia, la tecnología, el arte y la cultura [15].

### **Implementación del modelo de formación dual universitaria de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.**

En enero del 2017 se inician los trabajos para la implementación del modelo de formación dual conjuntamente con el Cluster automotriz GIRAA y la confederación de la industria alemana (bdi/ifg) en México. El 9 de junio del 2017 se integra el primer grupo de empresas que participarán en la implementación del modelo, para el mes de agosto del 2017 se firma convenio de cooperación entre la UT de Aguascalientes y el Cluster Automotriz GIRAA para formalizar la implementación del programa de formación dual. Para el 6 de

octubre del 2017 fue autorizado el programa de TSU en mecatrónica en modalidad dual por la SEP.

La figura 1 muestra el esquema de vinculación que se establece con el modelo de educación dual universitario de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.



Figura 1. Modelo de formación Dual Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Fuente: [2]

Las características especiales del modelo son:

- Flexibilidad. Para adecuar o crear programas académicos, así como para programar actividades de los alumnos tanto en la Universidad como en la empresa.
- Estudiante-aprendiz. Los participantes son estudiantes de la Universidad y aprendices en la empresa y por ello son apoyados económicamente para realizar esta última función.
- Actividades coordinadas. El proceso de admisión, las actividades académicas en la Universidad y en la empresa, son realizadas de manera coordinada Universidad - Empresa.
- Certificaciones. Las actividades realizadas en la empresa serán certificables o acreditables por la empresa y/o por la Universidad.
- Perfil del estudiante. Se seleccionan estudiantes con buen desempeño académico, motivados, responsables, organizados, dedicados, comprometidos y con apoyo familiar.
- Asignación de tutor e instructores. Se asigna un tutor (profesor de referencia) por parte de la Universidad y por parte de la empresa tutor empresarial y los instructores que imparten el programa de aprendices.

Los aspirantes a estudiar una carrera de TSU e Ingeniería en el modelo de formación dual o en alternancia, participan en un proceso de admisión, el cual se realiza en el primer cuatrimestre de la carrera, por la universidad y la empresa. Se seleccionan alumnos de alto desempeño académico,

motivados, dedicados, responsables, comprometidos y con apoyo familiar. Los jóvenes que aprueban el proceso de admisión son apoyados económicamente por la empresa para realizar la función de aprendiz - colaborador por el tiempo que dure la formación, con opción a formar parte del personal de la empresa, al egresar.

Para poner en operación el modelo de formación dual o en alternancia, la Universidad es responsable de cubrir la totalidad del plan de estudios, haciendo uso de sus recursos disponibles, tales como plantilla de profesores, planes de estudio, laboratorios, espacios físicos, biblioteca física y digital, servicios de apoyo estudiantil y servicios escolares.

La empresa, por otra parte, se hace cargo del desarrollo de las tareas en la misma, aportando al programa de actividades, instructores, asesoría para el desarrollo de proyectos de colaboración en la empresa, así como los espacios físicos (puestos de aprendizaje) para dichas actividades prácticas, todo esto será coordinado de común acuerdo.

La figura 2 muestra la planeación de las actividades académicas y laborales en el arranque del programa en agosto de 2017.



Figura 2. Planeación por cuatrimestres escuela - industria. Fuente: [2]

Para el proceso de selección se inscribieron 330 estudiantes de los cuales se seleccionaron 38, tomando como referencia los promedios de bachillerato, los resultados del EXANI II y los resultados en el examen de admisión que aplicamos en la institución. Posteriormente se les aplicó una batería de exámenes psicométricos, dichos resultados se les entregaron a los empresarios para que hicieran la selección de alumnos de acuerdo a los perfiles de su interés; después de dichos procesos se conformó el primer grupo con 19 Estudiantes de los cuales después del primer cuatrimestre por reprobación o deserción quedó finalmente conformado a 14 estudiantes.

Se desarrollo desde las coordinaciones de la carrera de Mecatrónica la distribución cuatrimestral de la carrera de Técnico Superior Universitario en Mecatrónica Área Automatización en competencias profesionales y modalidad

dual, fue revisado y aprobado por la Secretaria de Educación Pública desde la Dirección Académica de la Coordinación General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas. Incluye para el primero y segundo cuatrimestre las áreas de conocimiento en, ciencias básicas aplicadas, formación tecnológica, lenguas y métodos y habilidades gerenciales.

Para el tercer cuatrimestre los estudiantes incursionaron en su primera estancia de colaboración con la industria a la que se le denominó: **BASES PARA EL TRABAJO Y TECNOLOGÍAS PARA LA AUTOMATIZACIÓN.**

El tutor empresarial formula el que se considera el control de la fase empresarial, plan de capacitación y rotación de puestos clave de aprendizaje en una planeación de 16 semanas junto con el estudiante, y el profesor de referencia. La figura 3 muestra el esquema de la planeación empresarial guía para la estancia oportuna del estudiante.

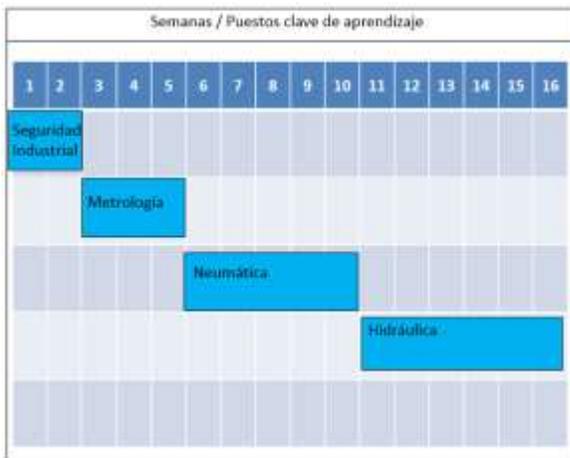


Figura 3. Control de la Fase Empresarial / Plan de Capacitación / Rotación. Fuente: (2).

En su primera estancia de colaboración dual el estudiante tendrá un seguimiento y será evaluado en: Actitudes, valores, convivencia con este respecto el estudiante debe mostrar en todas sus presentaciones, así como en su forma de actuar un comportamiento y desempeño conforme a las reglas, normas y políticas de la empresa, deberá llegar temprano y/o a tiempo a todos sus compromisos, deberá emplear un vocabulario apropiado en sus presentaciones. Su nivel de comunicación debe ser acorde con su preparación universitaria, deberá demostrar que sabe trabajar en equipo y se acopla fácilmente al trabajo con sus compañeros y en sus presentaciones y actuar diario, muestra respeto y sabe mantenerse ecuánime en las discusiones y situaciones críticas de la empresa.

Los puestos clave de rotación para el aprendizaje donde el estuante es entrenado y evaluado en el desarrollo de sus habilidades incluyen:

- Seguridad Industrial. El estudiante deberá aplicar procedimientos seguros de acuerdo a cada actividad asignada. Realizar procedimientos Lockout-tagout (LOTO) al intervenir una maquina o sistema. Seguir reglas de seguridad básica para manejo de energía eléctrica en baja tensión, para realizar trabajos en altura y para realizar trabajos en sistemas con fluidos sometidos a presión.
- Bases Metroológicas. El estudiante debe ser capaz de seleccionar el instrumento de medición correspondiente al parámetro a medir, la escala correspondiente y realizar la conexión adecuada cumpliendo con el procedimiento adecuado y las normas de seguridad.
- Hidráulica. El estudiante debe ser capaz de realizar: Diseño de un circuito hidráulico básico para sostener una carga de 500 kg desde el piso hasta una altura de 1 metro, mantener y regresar al piso, debe ser capaz de realizar una detección y diagnóstico de una falla en un circuito hidráulico y debe ser capaz de construir un circuito hidráulico de acuerdo a las indicaciones que los evaluadores determinen.
- Neumática. El estudiante debe ser capaz de diseñar un circuito neumático básico para sostener una carga de 100 kg desde el piso hasta una altura de 1 metro, mantener y regresar al piso, debe ser capaz de realizar una detección y diagnóstico de una falla en un circuito neumático, debe ser capaz de construir un circuito neumático de acuerdo con las indicaciones que los evaluadores determinen.

Para cada puesto clave de aprendizaje el alumno es entrenado y evaluado mediante listas de cotejo y guías de observación.

Para el sexto cuatrimestre los estudiantes incursionaran en su segunda estancia de colaboración con la industria, logrando el título de Técnico Superior Universitario en Mecatrónica Área Automatización en competencias profesionales y modalidad dual. A esta se le denominó: **AUTOMATIZACIÓN DE SISTEMAS.**

Para el noveno cuatrimestre los estudiantes incursionaran en su tercera estancia de colaboración con la industria a la que se le denominó: **AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES.**

Para el onceavo cuatrimestre los estudiantes incursionaran en su cuarta estancia de colaboración con la industria, logrando el título de Ingeniero en Mecatrónica en competencias profesionales y modalidad dual. A la que se le denominó:

## DISEÑO E INTEGRACIÓN DE SOLUCIONES INDUSTRIALES.

### Prácticas de vinculación en las empresas.

Para cada estancia en la empresa el estudiante en asesoría del tutor empresarial y el profesor de referencia, elaboran la Planeación del Proyecto de Práctica en colaboración, que debe incluir como ejes principales:

La descripción del procedimiento en la identificación del proyecto (¿cuál fue el motivo para seleccionar este proyecto?), Diagnóstico (Análisis de la situación actual), Objetivo, Indicador (métricos), Medición / fórmula, Meta, Fuente de datos (estado del arte), Presupuesto, Beneficios, Soporte indicador, plan operativo y periodo de aplicación. Y la aprobación y visto bueno de todas las partes.

Una vez concluido deberá ser sustentado (defendido) por el estudiante en una presentación, ante la empresa, la Universidad y los involucrados en la mejora e implementación.

Los proyectos defendidos y evaluados en la primera estancia de colaboración dual fueron 14, que corresponde al total de alumnos del primer grupo de formación dual universitaria;

La tabla 1 muestra los nombres de los proyectos defendidos en el cuatrimestre mayo - agosto 2018.

TABLA I. PROYECTOS DEFENDIDOS EN EL CUATRIMESTRE MAYO - AGOSTO 2018

Ingeniería inversa del sistema de control de rectificadora de superficies planas modelo MYS1224 MCLANE
Ingeniería inversa del sistema hidráulico de rectificadora de superficies planas modelo MYS1224 MCLANE
Ingeniería inversa del sistema eléctrico de rectificadora de superficies planas modelo MYS1224 MCLANE
Cambio rápido de paquete 18 estación 05
Sistema amplificador de presión inteligente (I BOOSTER)
Rehabilitación de sierras cinta
Implementación sistema de visión (ANDON) en líneas de producción.
Propuesta de implementación de alarmas (ANDON) en áreas como fresado, recortes, soldadura y acabado
Aseguramiento de calidad e implementación 5s en planta
Rediseño y desarrollo de la página web de la compañía.
Diseño de dispositivo mecánico de corte-desprendimiento de piezas plásticas.
Manejo automatizado de scrap en las vías de escape de máquinas de troquelado.
Formulación y estructuración del departamento de seguridad e higiene en planta
Implementación del departamento de seguridad e higiene en planta.

### Resultados.

Como parte de la selección de la primera generación del modelo dual se tomó en cuenta los siguientes criterios: promedio de bachillerato 8.5, resultados de EXANI 950 puntos y calificación de examen admisión mayor a 6, de un ingreso de 330 alumnos, se obtuvieron los mejores resultados quedando 80 alumnos en el proceso, lo cuales se les invito a una conferencia sobre el modelo dual reiterándoles en la misma el

compromiso a asumir para pertenecer a dicho modelo, de los cuales aceptaron 37. InnovaSystems es una empresa que crea soluciones a través de software innovador logra ofrecer productos de alta calidad y servicios de valor y excelencia, proporciona soluciones empresariales de calidad en gestión de datos [17]. El clúster automotriz GIRA apoyado de INNOVASI aplico un test psicométrico en línea al grupo de estudiantes a fin de conocer su compatibilidad por competencias para trabajar bajo presión. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

TABLA II. RESULTADOS DE TEST APLICADO EN LÍNEA POR INNOVACIÓN PARA LA COMPETITIVIDAD, SEPTIEMBRE 2017.

Dimensión de Competencia	Alto Desempeño	Medio Desempeño	Bajo Desempeño	Total	Dimensión de Competencia	Alto Desempeño	Medio Desempeño	Bajo Desempeño	Total
Adaptabilidad	48.64	37.85	13.81	100	Liderazgo	43.24	45.94	10.81	100
Amigabilidad	45.94	32.43	21.62	100	Orientación a resultados	42.16	27.82	10.81	100
Apego a normas	51.36	43.24	6.4	100	Orientación al cliente	75.87	13.21	8.1	100
Aprendizaje continuo	58.91	75.27	10.81	100	Pensamiento analítico	34.32	51.36	34.32	100
Comunicación	51.36	27.82	21.62	100	Solución de conflictos y negociación	46.76	32.43	10.81	100
Creatividad e innovación	43.34	48.64	8.1	100	Solución de problemas y toma de decisiones	72.97	16.81	8.1	100
Desarrollo del personal	75.27	16.81	10.81	100	Toma de riesgos	72.97	21.62	5.4	100
Iniciativa	45.94	43.24	10.81	100	Trabajo en equipo	48.64	35.13	16.21	100

Se muestra de los aspirantes un alto dominio de las competencias orientadas a desarrollo del personal, orientación al cliente, solución de problemas, toma de decisiones y riesgos.

La figura 5 muestra en logo las empresas que participaron en los procesos de selección una vez obtenidos los perfiles de los estudiantes.



Fig 5. Empresas participantes en el programa de Educación Dual en la UTA

Las empresas reclutaron 16 alumnos tomando en consideración el dominio de las competencias orientadas al apego de normas, comunicación, desarrollo de personal, orientación a resultados, orientación al cliente, solución de conflictos y negociación, solución de problemas y toma de

decisiones y riesgos, ubicando al 60% de los seleccionados con un alto dominio en las mismas.

La figura 6 muestra el porcentaje general del dominio total de las competencias de los 16 alumnos seleccionados.

DOMINIO DE COMPETENCIA	COMPATIBILIDAD POR COMPETENCIAS (BAJO PRESIÓN)
ALTO DESEMPEÑO	56%
MEDIO DESEMPEÑO	43.8%
BAJO DESEMPEÑO	0

Fig 6. Porcentaje general del dominio total de competencias de los alumnos seleccionados

Como resultado de la primera estancia de colaboración las empresas emiten una calificación final donde se combinan las habilidades y conocimientos evaluados en los puestos clave de aprendizaje, el proyecto de colaboración dual y la sustentación. Se muestran en la tabla 2 los resultados obtenidos del primer grupo del modelo dual.

TABLA VI. CALIFICACIÓN FINAL Y PROMEDIO OBTENIDO DE LA PRIMERA ESTANCIA DE COLABORACIÓN DUAL MAYO – AGOSTO 2018.

PROYECTO	FINAL	PROYECTO	FINAL
INGENIERÍA INVERSA DEL SISTEMA DE CONTROL DE RECTIFICADORA DE SUPERFICIES PLANAS NO DELO M/31204 MELANE	8.60	PROPUESTA DE IMPLEMENTACION DE ALARMAS (ANDON) EN AREAS COMO PRESADO, RECORTES, SOLDADURA Y ACABADO.	9.67
INGENIERIA INVERSA DEL SISTEMA HIDRAULICO DE RECTIFICADORA DE SUPERFICIES PLANAS NO DELO M/31204 MELANE	9.02	ASEGURAMIENTO DE CALIDAD E IMPLEMENTACION S/S EN PLANTA	10.00
INGENIERIA INVERSA DEL SISTEMA ELECTRICO DE RECTIFICADORA DE SUPERFICIES PLANAS NO DELO M/31204 MELANE	8.88	REDISEÑO Y DESARROLLO DE LA PAGINA WEB DE LA COMPAÑIA.	10.00
CAMBIO RAPIDO DE PAQUETE Y ESTACIÓN DE	9.53	DISEÑO DE DISPOSITIVO MECÁNICO DE CORTE-DESPRENDIMIENTO DE PIEZAS PLÁSTICAS	9.91
SISTEMA AMPLIFICADOR DE PRESIÓN INTELIGENTE (3 BO OSTER)	9.50	MANEJO AUTOMATIZADO DE SCRAP EN LAS VÍAS DE ESCAPE DE MÁQUINAS DE TROQUELADO	9.73
REHABILITACION DE SIERRAS CNTA	9.67	FORMULACION Y ESTRUCTURACION DEL DEPARTAMENTO DE SEGURIDAD E HIGIENE EN PLANTA	10.00
IMPLEMENTACION SISTEMA DE VISION (ANDON) EN LINEAS DE PRODUCCION	9.67	IMPLEMENTACION DEL DEPARTAMENTO DE SEGURIDAD E HIGIENE EN PLANTA	10.00
		PROMEDIO	9.6

Algunas de las opiniones de los tutores en planta del sector industrial al término de la primera estancia:

Muy atento, observativo y responsable, Dinámica, disciplinada, proactiva y muy buen pensamiento lógico, Lo hace muy bien con buena actitud, pero debe conocer más a fondo la palabra responsabilidad, Facilidad y rapidez de aprendizaje y autonomía de gestión, Es una persona muy flexible que se presta para apoyar en cualquier actividad. Muy

comprometido y entusiasta a la hora de aprender, Muestra interés por aprender, falta mejorar conocimiento en el manejo de software avanzado, Autónomo, responsable y con alto nivel de compromiso.

En el marco del proyecto “Innovation Partnership Germany – México/Pacific Alliance” se desarrolló un taller, sus objetivos fueron: Comprender mejor el modelo en la configuración de la marca “Duale Hochschule Baden-Württemberg”®; reflexionar los roles de los actores y averiguar el grado de identificarse con ellos; elaborar compromisos para cada segmento de actores con el fin de hacer más robusto el modelo en la región [18].

Al inicio del taller, se presentó una breve introducción sobre la justificación del encuentro y una explicación de la dinámica de los trabajos de grupo. Estuvieron presentes representantes del “Gobierno”, “Gremios”, “Empresas” y “Universidades”. Con todos estos participantes se espera un cambio de comportamiento para hacer más robusto el modelo de la formación dual universitaria y de esta manera garantizar a los clientes principales (empresas, estudiantes) una calidad comparable en las instituciones al momento de inscribirse para este modelo [18].

La figura 7 muestra el modelo guía donde se involucran los factores de éxito para el programa de educación dual universitaria.



Fig 7. El “Modelo Guía” comprende de los siguientes factores de éxito. Fuente: [18].

## Conclusiones

En la Universidad Tecnológica de Aguascalientes se está logrando una nueva forma de articulación entre la educación universitaria y la industria.

1. Se está logrando mostrar como el sistema dual de formación profesional alemán, logra desarrollarse con el uso de diferentes técnicas de investigación cualitativas.

2. Se está logrando analizar como la escuela encargada de formar profesionalmente a los aprendices contribuye a la instrucción impartida por la empresa.

3. Se está logrando la combinación de instituciones que es lo que caracteriza a este sistema de formación como dual universitario. Por tanto, el aprendiz, a la vez que se forma en la empresa, acude a las clases que se imparten en la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Este modelo sirve de paradigma a otros países que están intentando su desarrollo y aplicación, dadas las ventajas sociales y económicas que ofrece.

4. Se está constatando como con el presente modelo a diferencia de otros modelos de formación, donde si se contrata a un nuevo trabajador, es necesario instruirlo inicialmente. Con el sistema dual universitario de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes se eliminan los costos de entrenamiento o se mantienen en niveles mínimos. Las empresas que participan actualmente en este modelo, están convencidas de que podrán sacar provecho de esa inversión en capital humano a través de una mayor calidad de sus productos y de una mayor capacidad competitiva en los mercados.

## Referencias

- [1] Astorga, Lilia Guadalupe Covarrubias. EL MODELO DE FORMACIÓN DUAL DE BAJA CALIFORNIA: ¿UNA NUEVA FORMA DE ARTICULACIÓN ENTRE EDUCACIÓN Y EMPLEO? Colegio de la Frontera Norte, Tijuana Baja California: disponible en: <https://www.colef.mx>, 2018.
- [2] Vormfelde, Alfred. Formación dual técnica y superior en Alemania y México. Trayectorias diferentes y objetivos compartidos. Universidad de Guanajuato, León, Guanajuato: (Innovation Partnership Germany-México), 2017.
- [3] Morales, R. María Ascensión. sistema de aprendizaje dual: ¿una respuesta a la empleabilidad de los jóvenes? 2014, Revista Latinoamericana de Derecho Social, pp. 88 -91.
- [4] Palos Soto, Enrique. Herráiz Esteban, Marc. El sistema de educación dual: nuevas avenidas en la cooperación bilateral entre Alemania y México. 2013, Revista mexicana de política exterior, Vol. 99, pp. 97-115. ISSN: 0185-6022.
- [5] Embajada de la República Federal de Alemania Ciudad de México. La iniciativa alemana de la formación dual en México. Ciudad de México: Disponible en: <https://mexiko.diplo.de>, 2014.
- [6] Alemán, Falcón. Jesús A. El sistema dual de formación profesional alemán: escuela y empresa. [ed.] Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-97022015021532>, s.l.: Disponible en: 2015, Educ. Pesqui., São Paulo, Vols. ISSN 1678-4634, pp. 13-14.
- [7] Saavedra, García María Luisa. Una propuesta para la determinación de la competitividad en la pyme latinoamericana. [ed.] Universidad del Norte. 2017, pensamiento y gestión, Vol. 33, pp. 93-124. ISSN 2145-941X (on line). ISSN 1657-6276 (impreso).
- [8] Martínez, Vicente José Manuel. 2013. La orientación y el asesoramiento vocacional., padres y maestros, Vol. 353, p. 37.
- [9] Cubillos, Claudia Gil. Comunicadores corporativos: desafíos de una formación profesional por competencias en la era global. 2010, Centro de Estudios en Diseño y Comunicación, Vol. 33, pp. 49-59. ISSN 1668-5229.
- [10] Opertti, Renato. Carolina Belalcázar. Tendencias de la educación inclusiva a nivel regional e interregional: temas y desafíos. 2008, Perspectivas, Vols. vol. XXXVIII, n° 1, pp. 150-156.
- [11] Aguascalientes, Universidad Tecnológica de. calidad.utags.edu.mx. calidad.utags.edu.mx. [Online] marzo 18, 2019. <http://calidad.utags.edu.mx/UTAdocs>.
- [12] INEGI. Información por entidad. Disponible en: [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx) : INEGI, 2015.
- [13] SEP. Rezago Educativo-Aguascalientes. Disponible en: <http://www.inea.gob.mx>. [Online] 2015.
- [14] Luévano, Núñez Francisco Javier. Aguascalientes educado, integrado y equitativo. Periódico Oficial del Estado de Aguascalientes. mayo 30, 2017, pp. 12-13.
- [15] Cruz, López Yazmín. Anna Karina Cruz López. La educación superior en México tendencias y desafíos. [ed.] Universidad de Sorocaba. 2, julio 2008, Avaliação, Vol. 13, pp. 294-298.
- [16] Arreola, Soria Héctor. Coordinador General de Universidades Tecnológicas y Politécnicas. México: 2017.
- [17] competitividad, Innovación para la. INNOVASI. INNOVASI. [Online] marzo 27, 2019
- [18] Vormfelde, Alfred. Reflexión de los factores de éxito y el rol de los actores en la Formación Dual Universitaria. Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Aguascalientes: 2019

## 5. Biografías

**Gerardo Brianza Gordillo.** Maestro en Manufactura Avanzada. Ingeniero Mecánico. Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Responsable del cuerpo académico en consolidación de sistemas mecatrónicos, miembro de la Comisión Técnica Iberoamericana de Robótica y Mecanismos. Profesor de referencia del Modelo Dual Universitario. Líneas de investigación en diseño, modelado y simulación mecánica, sistemas hidráulicos y neumáticos.

**Fernando Alejandro Villa Martínez.** Maestro en Ciencias de la Educación. Ingeniero Mecánico. Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Miembro del cuerpo académico en consolidación de sistemas mecatrónicos. Profesor de referencia del Modelo Dual Universitario. Líneas de investigación en diseño, modelado y simulación mecánica, PLC y Robótica.

**Christian Irving Enrique Rodríguez González.** Maestro en Manufactura Avanzada. Ingeniero Mecánico. Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Miembro del cuerpo académico en consolidación de sistemas mecatrónicos. Líneas de investigación en procesos de manufactura avanzada y materiales.

**Judith Elizabeth Luévano Aguilar.** Maestra en Terapia Gestalt. Lic. En Psicología. Profesora de Tiempo Completo y gestora académica en el área de electromecánica industrial y energías de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes.

# Prueba de usabilidad para la evaluación del prototipo de audio para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes de 10 a 25 años de edad del Valle de Teotihuacán

Bustamante, A.<sup>1,a</sup>, Esquivel, S.<sup>1,b</sup>, González, N.<sup>1,c</sup>, Peña, C.<sup>1,d</sup>, Gutiérrez, L.<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México  
Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán

<sup>a</sup> abustamantea@uaemex.mx, <sup>b</sup> susanaer\_re83@yahoo.com, <sup>c</sup> nlgonzalez6@gmail.com, <sup>d</sup> karlitaluky2009@hotmail.com, <sup>e</sup> lindagutierrezg@gmail.com

**Resumen**—En el siguiente artículo se presenta el desarrollo de una prueba de usabilidad que será aplicada a un prototipo de audio diseñado en trabajos anteriores que tiene la finalidad de ayudar a prevenir problemas de audición, y ya estando culminando la última etapa de la metodología a seguir, la etapa de desarrollo, una vez realizada la prueba de viabilidad social y con la finalidad de evaluar la calidad de dicho dispositivo, se diseña la prueba de usabilidad a la que será sometido para realizar mejoras en caso de requerirlas una vez haya sido evaluado, así mismo se indica la muestra, el lugar de aplicación, el tipo de prueba, y el instrumento a utilizar.

*Palabras clave.* Usabilidad, prototipo, amplificador, metodología, evaluación, calidad.

## 1. Introducción

Como trabajos posteriores a este se presentó el artículo titulado “Diseño de un prototipo de audio mediante la implementación de circuitos electrónicos para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes con edades de entre los 10 a 25 años en el Valle de Teotihuacán” se planteó la metodología a seguir para el desarrollo de un dispositivo de audio, que propone ayudar a la disminución de la pérdida auditiva. (Peña, Gutiérrez & Bustamante, 2018).

En el artículo titulado “Viabilidad del prototipo de audio elaborado por medio de circuitos electrónicos para la mejora de calidad de audio en las aulas virtuales y digitales de los diversos espacios académicos” en el que se presenta una análisis realizado a una prueba de viabilidad social para el desarrollo del dispositivo de audio. (Peña, Gutiérrez & Bustamante, 2019).

Derivado de los artículos anteriores se realiza una prueba de usabilidad que será aplicada a un muestra de 30 personas en el Valle de Teotihuacán acerca, en la que se pretende mediante una encuesta desarrollada en formularios de google titulada “Prueba de usabilidad del dispositivo de audio” en la que se pretende recabar información acerca de la imagen, el funcionamiento y el tamaño del dispositivo desarrollado.

## 2. Desarrollo

Una vez que se obtuvieron los resultados de la prueba de viabilidad social, se procede al desarrollo de una prueba de usabilidad que será aplicada al dispositivo una vez que se haya culminado la etapa de desarrollo, para poder dar paso a la etapa de producción.

Según la página de HostGator México una prueba de usabilidad es una técnica usada para evaluar un producto mediante pruebas con los mismos usuarios. (2018).

Dichas pruebas se enfocan en medir las capacidades o las características que dicho dispositivo presume cumplir, de este modo los usuarios son los encargados de constatar si vale la pena invertir en ese producto y que aspectos se deben mejorar en dicho dispositivo.

### A. Objetivo de la prueba de usabilidad.

El objetivo de la creación de la prueba de usabilidad, es para que los usuarios puedan evaluar el funcionamiento de algunas características que posee el dispositivo y de este modo poder realizar los ajustes pertinentes antes de iniciar la producción del dispositivo, también de igual forma poder considerar aspectos de imagen como el tamaño, el color, etcétera.

### B. Características a evaluar en el dispositivo.

El diseño del dispositivo de audio inicialmente se creó para poder ser utilizado en cualquier ámbito, pero debido a la realización de ajustes en presupuesto, se pretende aplicar en espacios académicos principalmente aulas virtuales y digitales.

Debido a lo anterior, las características más importantes a evaluar son:

- Diseño del dispositivo: En un inicio se estableció que el dispositivo contara con un Splitter que permite la conexión de artefactos tales como auriculares, amplificadores, etcétera.
- La salida del audio debe ser:

- Volumen alto.
- No debe lastimar el oído.
- No debe contener vibraciones.
- No debe contener ruido.
- Botón o perilla para controlar el volumen.
- El tamaño debe ser de considerable.
- Transportable.
- Ligero.

C. Tipo de prueba a utilizar.

El tipo de prueba a utilizar para la evaluación del prototipo será mediante la utilización de una encuesta, esta encuesta consta de 20 ítems que pide a los usuarios colocar el grado en el que ellos consideran que el dispositivo cumple o satisface la característica prometida.

D. Muestra y lugar de aplicación de la prueba.

La prueba será aplicada a 30 personas en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán con edades entre los 18 a 23 años de edad.

E. Diseño de prueba de usabilidad.

Para el diseño de la prueba de usabilidad del prototipo se tomó en cuenta la sección de las características para poder realizar la formulación de los 20 ítems.

Se da únicamente dos posibles opciones de respuesta que son Si y No debido a que las preguntas son claras y directas, si el dispositivo cumple la característica al 100% es un Si y en caso contrario es un No al igual tiene un apartado para especificar cuál es la opinión de los usuarios que prueban el prototipo, esto permite adquirir opiniones más claras, y realizar una evaluación más profunda, así mismo permite conocer mejor la percepción de los usuarios y las inconformidades o incomodidades que presentaron al momento de la evaluación.

Al finalizar la encuesta que consta de 20 ítems, 17 dedicados específicamente a la evaluación del diseño del prototipo, imagen, tamaño y calidad de la salida de audio y 3 últimos que están enfocados en la producción del dispositivo, se colocó una sección de observaciones y sugerencias que pide a los evaluadores que coloquen alguna sugerencias que tengan que ayude a mejorar algunos detalles que no se calificaron en la encuesta o simplemente den aportaciones para la mejora del prototipo.

F. Prueba de usabilidad.

La encuesta diseñada que se aplicara a la muestra mencionada anteriormente se visualiza en la tabla 1.

Instrucciones de llenado de la prueba de usabilidad: coloca una cruz en la respuesta que tú consideras que satisface más al ítem, en caso de colocar como respuesta “No”, se te pide que la especifiques.

TABLA I. PRUEBA DE USABILIDAD PARA EVALUACIÓN DE PROTOTIPO DE AUDIO

No.	Ítem	Si	No	Especifica
1	¿El dispositivo cumple con las características físicas que prometía?			
2	¿La salida del audio es volumen alto?			
3	¿La salida de audio te lastima el oído?			
4	¿Sientes vibraciones en el oído o en el cuerpo?			
5	¿La salida del audio es limpia?			
6	¿La salida de audio contiene ruido?			
7	¿La salida de audio se distorsiona?			
8	¿El prototipo posee una perilla o botón que permita regular el volumen?			
9	¿Consideras que el tamaño del dispositivo es el indicado?			
10	¿Consideras que el peso del dispositivo es el adecuado?			
11	¿Crees que puedas transportar el dispositivo de un lugar a otro sin problema?			
12	¿La calidad del audio original cambia?			
13	¿Mediante el uso del dispositivo con auriculares la calidad del audio es la misma?			
14	¿Se pueden conectar dispositivos extras al prototipo?			
15	¿Consideras que la calidad de los materiales de los que esta echo el dispositivo es buena?			
16	¿Al utilizar mucho tiempo el prototipo se calienta?			
17	¿A constantes horas de utilizar el prototipo te causa sensación de oídos tapados?			
Las siguientes tres preguntas están enfocadas en la producción del prototipo.				
18	¿Crees que el dispositivo está listo para iniciar la producción?			
19	¿Consideras que el dispositivo esta completamente desarrollado?			
20	¿Le agregarías o modificarías algunas cosas al dispositivo?			

Observaciones y sugerencias:

---



---



---



---

UAEM Valle de Teotihuacán y forman parte del cuerpo académico: “Estudios ambientales, socioculturales, tecnologías y políticas públicas”. Finalmente han realizado publicaciones y ponencias a nivel nacional e internacional.

Carla María Guadalupe Peña Hernández, estudiante del último semestre de la Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación tales como “La casa del agua” presentada en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, también “Diseño de un prototipo de audio mediante la implementación de circuitos electrónicos para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes con edades de entre los 10 a 25 años en el Valle de Teotihuacán” presentado en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

Linda Daniela Gutiérrez Guerrero, estudiante del último semestre de la licenciatura en Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación tales como “La casa del agua” presentada en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, también “Diseño de un prototipo de audio mediante la implementación de circuitos electrónicos para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes con edades de entre los 10 a 25 años en el Valle de Teotihuacán” presentado en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

---

---

### 3. Conclusiones

Las pruebas de usabilidad son muy aplicadas en el desarrollo de numerosos proyectos, principalmente de aquellos que tiene como finalidad la evaluación de productos.

El fin principal de estas pruebas, es la mejora de las características de los productos.

Existen varios tipos de pruebas o test de usabilidad que se adaptan a cada tipo de producto ya sea de tipo electrónico, tecnológico, gastronómico, etcétera.

El mejorar las características de un producto, ayuda a aumentar su calidad, y por ende mejora el precio de mercado, la reputación y las ventas.

### 4. Referencias

- [1] Peña, C. & Gutiérrez, L. & Bustamante, A. (2018). Diseño de un prototipo de audio mediante la implementación de circuitos electrónicos para la disminución de la pérdida auditiva en jóvenes con edades de entre los 10 a 25 años en el Valle de Teotihuacán. En J. Solis (Presidencia), *Primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines*. Congreso llevado a cabo en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, México.
- [2] Peña, C. & Gutiérrez, L. & Bustamante, A. (2019). Viabilidad del prototipo de audio elaborado por medio de circuitos electrónicos para la mejora de calidad de audio en las aulas virtuales y digitales de los diversos espacios académicos. En M. Prieto (Ed.), *Innovation and practice in education, Innovación y práctica educativa* (pp. 409-417). Cd. Real, España: Ed. CIATA.org.
- [3] HostGator. (8 de Noviembre de 2018). ¿Qué es un test de usabilidad y para qué sirve? Recuperado de <https://www.hostgator.mx/blog/que-es-un-test-de-usabilidad/>

### 5. Biografías

Adriana Bustamante Almaraz es Licenciada en Informática Administrativa desde 2007. En 2010 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias de la Computación, ambos títulos obtenidos por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2017 obtuvo en grado de Doctora en Tecnología e Innovación Educativa por la Universidad Centroamericana.

Susana Esquivel Rios es Licenciada en Turismo con especialidad en Docencia Turística desde 2002. En 2012 obtuvo el grado de Maestra en Estudios Turísticos, ambos títulos obtenidos por la Facultad de Turismo y Gastronomía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es Doctorante en Estudios Turísticos de la misma Facultad.

Norma Lizbet González Corona es Licenciada en Derecho desde 2003 por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2009 obtuvo el grado Maestra en Derecho por el Centro Universitario del Valle de Teotihuacán.

Así mismo son Profesoras Investigadoras de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario

# Estudio de factibilidad para un prototipo de sistema embebido multimedia en la enseñanza del idioma inglés para niños de 5 a 12 años

Bustamante, A.<sup>1,a</sup>, González, N.<sup>1,b</sup>, Esquivel, S.<sup>1,c</sup>, Ramos, J.<sup>1,d</sup>, Briseño R.<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Estado de México  
Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán

<sup>a</sup>abustamante@uaemex.mx, <sup>b</sup>nlgonzalez6@gmail.com, <sup>c</sup>susanaer\_re83@yahoo.com, <sup>d</sup>juan\_arn5@hotmail.com, <sup>e</sup>alfonsobiseno33@gmail.com

**Resumen**— Actualmente existe un gran interés por el desarrollo de sistemas embebidos, principalmente por el aumento de la flexibilidad del sistema y la disminución de costos. El presente escrito tiene como objetivo principal evaluar los resultados obtenidos durante el desarrollo del prototipo de un sistema embebido sistemático de multimedia, que permita el aprendizaje del idioma inglés para niños entre 5 a 12 años. La evaluación se realiza a través de la usabilidad donde se analizan los resultados de la aplicación del instrumento de evaluación para verificar si nuestro prototipo pueda servir de manera factible hacia la sociedad, por otra parte la propuesta será establecida por las normas ISO 15408 y 25012. El prototipo del sistema embebido multimedia estará orientado a minimizar costos y maximizar la confiabilidad así como la seguridad.

**Palabras clave.** Microprocesador, Tarjeta Madre, Sistema Embebido, Prototipo.

## 1. Introducción

Los avances tecnológicos de los microprocesadores hoy en día se acercan más al ámbito de la sociedad del siglo XXI, su presencia ha comenzado a cambiar la forma en que se percibe el mundo e incluso en la sociedad de la información, ninguna otra invención en la historia se ha diseñado tan aprisa por todo el mundo, hoy existen casi 15,000 millones de microchips de diferentes clases [5].

Un microprocesador es una pastilla de muy alta escala de integración, que realiza las tareas de la unidad central de tratamiento de una microcomputadora u otro sistema de control automático [5]. Algunos de los elementos que lo conforma son: conexiones de alimentación, tamaños de bits, líneas de datos, dirección y control, además de los registros internos. Esto da pauta para el diseño de sistemas embebidos o empotrados, se definen como un sistema de computación diseñado para realizar una o algunas pocas funciones dedicadas, frecuentemente en un sistema de computación en tiempo real [9]. Los sistemas embebidos se diseñan para cubrir necesidades específicas, algunos ejemplos de sistemas embebidos podrían ser dispositivos como un taxímetro, un sistema de control de acceso, la electrónica que controla una máquina expendedora o el sistema de control de una fotocopiadora entre otras múltiples

aplicaciones. En un sistema embebido la mayoría de los componentes se encuentran incluidos en la placa base (tarjeta de video, audio, módem, etc.) [10].

### A. Placa Base

La placa base es una tarjeta de circuitos impresos que es el hogar de muchas de las partes esenciales de la computadora. La tarjeta madre une los componentes operativos de la *personal computer* (PC), incluso los dispositivos como las impresoras, discos duros, los CD-ROM y similares, se conectan a la tarjeta madre o están controlados por dispositivos que se encuentran en dicha tarjeta [10].

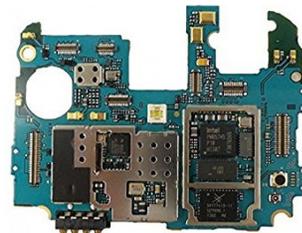


Figura 1. Representa el ejemplo de una Placa Base Fuente: Tokheim 2004

Los programas de sistemas embebidos se enfrentan normalmente a tareas de procesamiento en tiempo real. Existen también plataformas desarrolladas por distintos fabricantes que proporcionan herramientas para el desarrollo y diseño de aplicaciones y prototipos con sistemas embebidos desde ambientes gráficos, algunos ejemplos de éstas son: *Arduino*, *mbed*, *Raspberry Pi*, *BeagleBone*, plataforma X299etc. [7].

Saber inglés se ha convertido en una competencia básica de estudiantes de todos los niveles educativos. Pero ¿por qué es tan importante el idioma inglés? Según Calderón (2016), porque hay más de dos mil millones de personas que lo usan regularmente y además se habla en 138 países, porque 4 de cada 5 interacciones en inglés se dan entre personas para las cuales ese idioma no es su lengua materna [3].

Se pretende establecer la propuesta a través de la norma ISO 15408, la cual define un criterio estándar a usar como base para la evaluación de las propiedades y características de seguridad de determinado producto o sistema IT. Permite la equitación entre los resultados de diferentes e independientes evaluaciones, al proporcionar un marco común con el que determina los niveles de seguridad y confianza que implementa un determinado producto en base al conjunto de requisitos de seguridad y garantía que satisface respecto a esta norma obteniendo de esa forma una certificación oficial de nivel de seguridad que satisface [11].

Al igual que la norma ISO 25012, la cual ofrece el modelo de Calidad de Datos representa los cimientos sobre los cuales se construye un sistema para la evaluación de un producto de datos. En un modelo de Calidad de Datos se establecen las características de Calidad de Datos que se deben tener en cuenta a la hora de evaluar las propiedades de un producto de datos determinado.

La Calidad del Producto de Datos se puede entender como el grado en que los datos satisfacen los requisitos definidos por la organización a la que pertenece el producto. Son precisamente estos requisitos los que se encuentran reflejados en el modelo de Calidad de Datos mediante sus características (Exactitud, Completitud, Consistencia, Credibilidad, Actualidad, Accesibilidad) [6].

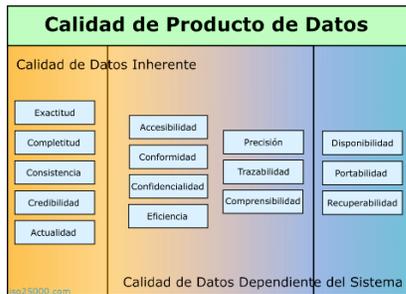


Figura 2. Modelo de calidad de datos Fuente: ISO 25000 2017

En el artículo denominado “Sistema Integral para el diseño e implementación de control asistido por computadora”, los autores David L. Leal & Miguel R. Celib presentan el desarrollo de un sistema de adquisición de datos y control altamente interactivo, de bajo costo y basado en un computador personal. El sistema está constituido por un hardware basado en un microprocesador y un software basado en estándares abiertos, el software utiliza programación de diagramas de bloques como base para el diseño teórico e implementación de un sistema de control, con la finalidad de hacer que la promoción sea sencilla y rápida [4].

Uno de los trabajos relacionados a este artículo es una aplicación móvil basada en el contexto para promover el aprendizaje del idioma inglés desarrollado por los autores Francisco Aguilar Acevedo, Guadalupe Toledo, y Daniel Pacheco Bautista. Mencionan el desarrollo de una aplicación Android para promover el aprendizaje del idioma inglés basada en información provista por el usuario que le resulta de su interés. Se presenta el diseño del contenido educativo y de la aplicación móvil que permiten al usuario generar su propio material didáctico en base a sus intereses. Como caso de estudio se considera la evaluación de la aplicación para el área de las ciencias computacionales [1].

## 2. Metodología

La metodología que se implementó para el desarrollo del prototipo de un sistema embebido multimedia para la enseñanza del idioma inglés se basa en cinco etapas como se visualiza en la figura 2.



Figura 3. Metodología del prototipo del sistema embebido multimedia en la enseñanza del idioma inglés Fuente: propia.

### A. Comparación de las diferentes plataformas existentes

En este apartado se realizó una comparativa de las diferentes plataformas existentes en el diseño de microprocesadores para el desarrollo de un sistema embebido. En el proceso de investigación se efectuó bajo un enfoque cuantitativo de tipo documental con un alcance exploratorio, ya que se aplicaron pruebas a partir de una serie de hechos particulares, el cual permitió analizar las diferentes plataformas existentes en la creación de microprocesadores, las cuales den pauta para un sistema embebido de multimedia.

Las plataformas exploradas son: *Arduino*, *mbed*, *Raspberry Pi*, *BeagleBone*, Intel X299, las cuales se detallan en la tabla 1.

TABLA 1. COMPARATIVA ENTRE LAS DIFERENTES PLATAFORMAS A EVALUAR FUENTE: PROPIA.

Plataforma	Características
X299	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estado Launched</li> <li>✓ Velocidad del bus 8 GT/s DMI3</li> <li>✓ Tecnología Turbo Max 3.0</li> <li>✓ TDP 6 W</li> <li>✓ Cantidad de DIMM por canal 2</li> <li>✓ Configuraciones de PCI Express x1, x2, x4</li> <li>✓ Cantidad de puertos USB 14</li> <li>✓ USB 3.0 Up to 10</li> <li>✓ Cantidad máxima de puertos SATA 6,0 Gb/s 8</li> </ul>
Arduino	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Placa basada en el microcontrolador ATmega328P</li> <li>✓ Voltaje de entrada 7-12V.</li> <li>✓ 14 pines digitales de I/O (6 salidas PWM).</li> <li>✓ 6 entradas análogas.</li> <li>✓ 32k de memoria Flash.</li> <li>✓ Reloj de 16MHz de velocidad.</li> </ul>
mbed	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Placa de desarrollo para los microcontroladores ARM LPC2368 y LPC1768</li> <li>✓ Zócalo DIP de 40 pines</li> <li>✓ Microcontrolador ARM de 32-bits con un núcleo Cortex-M3 corriendo a 60Mhz.</li> <li>✓ compilador es bajo un entorno web</li> <li>✓ 64K de RAM y 512K de flash</li> <li>✓ MBED sigue un la filosofía arduino</li> </ul>
Raspberry Pi	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Procesador de cuatro núcleos a 1,4 GHz de 64 bits,</li> <li>✓ LAN inalámbrica de doble banda,</li> <li>✓ Bluetooth 4.2 / BLE, Ethernet más rápida</li> <li>✓ soporte de Power-over-Ethernet (con PoE HAT independiente)</li> <li>✓ Alimentación 2,5 W (modelo A), 3,5 W (modelo B)</li> <li>✓ Frecuencia de reloj 700 Mhz</li> </ul>
BeagleBone	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alcanza el nivel de 1 GHz con interfaces periféricas flexibles y un ecosistema comprobado de tableros de complementos "Cape"</li> <li>✓ Puede ser programada en una gran variedad de lenguajes: C/C++/C#, Java, Python, Ruby, PHP, Javascript, Node.js, Octave, etc.</li> <li>✓ Procesador: Sitara AM3359AZCZ100 1GHz, 2000 MIPS</li> <li>✓ Procesador Gráfico: SGX530 3D, 20M Polygons/S</li> <li>✓ Memoria SDRAM: 512MB DDR3L 606MHZ</li> <li>✓ Flash en le Placa: 2GB, 8bit Embedded MMC</li> <li>✓ PMIC: TPS65217C PMIC regulador y un LDO adicional.</li> <li>✓ PCB: 3.4" x 2.1" 6 capas</li> </ul>

Al realizar el proceso de comparación se decidió trabajar con la plataforma Intel X299 la cual proporciona tecnología Turbo Max 3.0, es decir es una tecnología de punta hoy en día que pueda facilitar la creación del prototipo de sistema embebido planteado.

### B. Estudio de factibilidad

Se realizó lo que es el estudio de factibilidad esto a través de la elaboración de un instrumento de evaluación, en este caso fue un cuestionario para la obtención de datos basado en la escala *Likert*.

Cabe mencionar que el instrumento se aplicó a una muestra de 72 personas, de las cuales 20 son especialistas del área de tecnología, 5 son especialistas del idioma inglés, 38 alumnos de un grupo de inglés avanzado del Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, los restantes fueron elegidos al azar dentro de la sociedad de diferentes edades, esto se realizó con ayuda de la herramienta de Google "Google Forms".

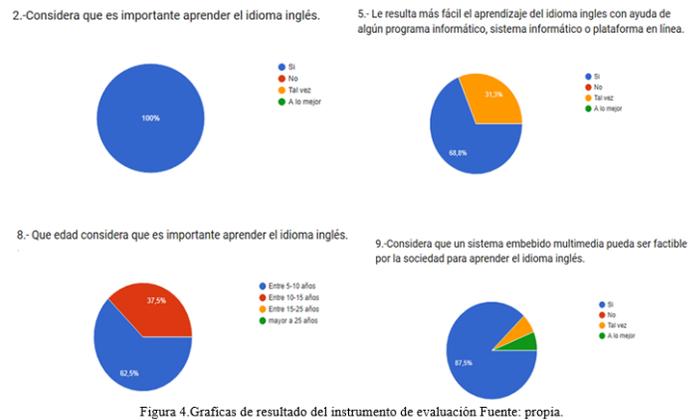


Figura 4. Graficas de resultado de estudio de factibilidad Fuente: propia

El 50 por ciento de la muestra ha tenido buena interacción con las TIC'S. El 100 por ciento de la muestra considera que el aprendizaje del idioma ingles es de suma importancia. Con un 68.8 por ciento de la muestra practica de vez en cuando el idioma ingles y el otro 31.2 por ciento no practica el idioma inglés, o casi siempre. El 100 por ciento de la muestra se dedica a estudiar entre 0 a 2 horas el idioma inglés. La muestra considera con un 68.8 por ciento que le resulta más fácil el aprendizaje del idioma ingles con ayuda de algún programa informático, sistema informático o plataforma en línea, por lo tanto, con un 75 por ciento se considera que la muestra adquiere mayor motivación a la hora del aprendizaje del idioma ingles si se trabaja con ayuda de un software, sistema informático o plataforma en línea. Por otro lado, con un 62.5 por ciento de la muestra considera la calidad de los programas informáticos o plataformas en línea, que existen hoy en día para la enseñanza del idioma inglés como una buena opción. Con un 62.5 por ciento se considera que es importante empezar aprender el idioma ingles entre 5 a 10 años de edad. La muestra considera con un 87.5 por ciento como una buena idea un sistema embebido multimedia pueda ser factible por la sociedad para aprender el idioma inglés. Por último, la población considera que es más significativo

aprender el idioma inglés que otros idiomas como el francés, alemán, español entre otros con un 81.3 por ciento.

Al aplicar el instrumento de estudio de factibilidad se pudo observar que la mayoría de la población considera que es más fácil adquirir el conocimiento a través de un sistema informático o plataforma en línea y que es importante adquirir el aprendizaje del idioma inglés entre los 5 a 12 años, debido que es más prioritario que otros idiomas según los indicadores que se obtuvieron al analizar los datos durante la evaluación del instrumento.

### C. Elaboración del prototipo de diseño

En esta etapa se realizó el diseño del prototipo del sistema multimedia para la enseñanza del idioma inglés, dicho diseño está orientado a minimizar los costos y maximizar la confiabilidad así como la seguridad de sí mismo.

Por otro lado fue necesario realizar el análisis de las implicaciones que se pudieran generar a nivel de gestión, presupuesto, recursos humanos, seguridad y estándares de integración que se requirieron en la elaboración del sistema embebido.

Los estándares en que se basa el diseño del prototipo son:

- ✓ Norma ISO 15408
- ✓ Norma 25012

Además se tuvo que contemplar en el diseño algunos de los servicios que se proporcionarían en el sistema embebido para la enseñanza del idioma inglés puede que entren en desuso o que evolucionen a otros nuevos, este punto es importante debido que va generar interés hacia el usuario, de esta manera podrá ser factible dicho prototipo.

### D. Desarrollo del sistema embebido

Se puso en marcha el desarrollo para la creación y diseño del sistema embebido en base al diseño planteado en la tercera etapa, llevando el control para garantizar que el camino que se lleva, se va acercando al objetivo.

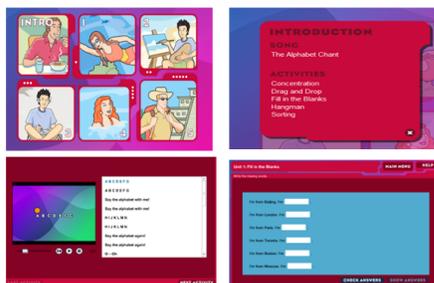


Figura 5. Representa algunas de las imágenes del sistema embebido para el aprendizaje del idioma inglés Fuente: propia

### E. Validación del sistema embebido por parte del usuario

Se aplicó el instrumento de evaluación para la validación del sistema embebido por parte del usuario a través de personas especializadas en el tema haciendo uso de la usabilidad, de esta manera permitirá detectar si existe alguna falla en el diseño del prototipo del sistema embebido, para que así se pueda mejorar la estructura del sistema embebido.

El instrumento de evaluación se realizó a una muestra de 60 personas, de las cuales 25 son especialistas del área de tecnología, 5 son especialistas del idioma inglés y 30 alumnos de un grupo de inglés avanzado del Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, esto a través de la ayuda de la herramienta de Google "Google Forms".

1.- ¿Cómo califica el diseño del producto?			
1.- Malo	2.- Regular	3.- Bueno	4.- Excelente
2.- ¿El producto es innovador?			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor
3.- ¿El producto supera las expectativas?			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor
4.- Considera que el producto tiene buena presentación			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor
5.- El producto satisface las tareas indicadas			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor
6.- A grandes rasgos ¿Qué tan satisfecho está con este producto?			
1.- Totalmente insatisfecho	2.- Insatisfecho	3.- Satisfecho	4.- Muy satisfecho
7.- Elige entre las opciones de calidad que considera de este producto			
1.- Muy baja calidad	2.- Baja calidad	3.- Normal	4.- Buena calidad
8.- Comparándolo con otros productos de la misma índole, este producto es			
1.- Peor	2.- Igual	3.- Mejor	4.- Mucho mejor
9.- El producto es de gran impacto para optimizar recursos			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor
10.- Comparándolo con otros productos de la misma índole, este producto es			
1.- Si	2.- No	3.- Tal vez	4.- A lo mejor

Figura 6. Creación del instrumento para la validación del sistema embebido Fuente: propia

Una de las grandes ventajas que brinda la herramienta "Google Forms", es que automáticamente va representando los datos estadísticos a través de gráficas, eso facilita el análisis de resultados y ahorro tiempo, a continuación se muestran las principales gráficas obtenidas a través de los datos estadísticos que se obtuvieron durante la aplicación del instrumento.

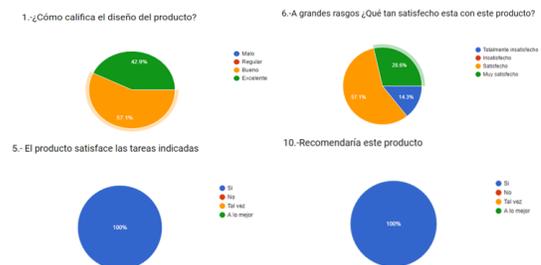


Figura 7. Graficas de resultado para validación del sistema embebido por parte del usuario Fuente: propia

El 57.1 por ciento de la muestra califica excelente el diseño del producto, mientras que el 42.9 por ciento lo califica como bueno. El 100 por ciento de la muestra considera que el producto es innovador, con un 85.7 por ciento de la muestra menciona que el producto supera las expectativas y el otro 14.3 por ciento menciona que tal vez mejora las expectativas. Por otra parte el 85.7 por ciento de la muestra considera que el producto contiene una buena presentación. El 100 por ciento de la muestra indica que el sistema embebido realiza las tareas indicadas. Con un 57.1 por ciento de la muestra se encuentra satisfecha con el sistema embebido para la enseñanza del idioma inglés, mientras que el 28.6 está muy satisfecha con el producto y un 14.3 de la muestra está muy insatisfecha por el producto. De igual manera con el 57.1 por ciento de la población considera el producto de buena calidad. Comparando el diseño del sistema embebido con otros productos de la misma índole el 57.1 por ciento de la muestra menciona que es mejor mientras que 42.9 por ciento dice que es mucho mejor. Por último la población considera que el sistema embebido lo recomendaría hacia otras personas.

### 3. Discusión y resultados

A través del instrumento de validación del sistema embebido por parte del usuario y los indicadores obtenidos, se considera de manera factible la propuesta de un sistema embebido multimedia en la enseñanza del idioma inglés para niños entre 5-12 años. Como se sabe el idioma inglés se ha convertido en una competencia básica en cualquier ámbito entre los que destaca el educativo y el laboral, la mayoría de la población está satisfecha con el producto presentado, además de que lo califican como bueno y con una buena presentación.

Según los indicadores que se obtuvieron al analizar los datos la población recomendaría el sistema embebido hacia otras personas durante la evaluación del instrumento.

### 4. Conclusiones

El trabajo presentado busca situar el interés del usuario por un tipo de entretenimiento en particular, como una herramienta para romper la barrera que representa el inglés, debido a los frecuentes escenarios en el que los estudiantes que cursan sus estudios de inglés, aún muestren fuertes carencias en conceptos básicos del idioma.

La investigación e innovación en el diseño de nuevas tecnologías aplicadas y centradas en los usuarios reales del proceso de enseñanza o aprendizaje son fundamentales para

lograr mantener servicios que puedan satisfacer requerimientos de manera eficiente.

En trabajos futuros se pondrá en marcha la propuesta del sistema embebido, no mayor a 3 meses. Se realizarán pruebas pilotos en organizaciones de escuelas públicas y privadas para visualizar si nuestro prototipo es factible, además de identificar si existen errores que se puedan corregir y así poder generar un impacto positivo para los estudiantes que requieran aprender del idioma inglés.

### 5. Referencias

- [1] Aguilar Acevedo, G. T. (2017). Aplicación móvil basada en el contexto para promover el aprendizaje del idioma inglés. Recibe.
- [2] Astrom K. & Wittenmark B. (2016) Computer Control Systems. Theory and design. Prentice Hall.
- [3] Calderón, D. (2016). Introducción al reporte Sorry y al aprendizaje del inglés en México. México: Mexicanos Primero. Recuperado de <http://www.mexicanosprimero.org/images/stories/sorry/discurso-david-calderon-sorry.pdf>.
- [4] Celib., D. L. (2018). Sistema integral para el diseño e implementación de control asistido por computadora. ScienceDirect, 1-10.
- [5] Gilster, R. (2017). Guía Completa para PC. (págs 25-89) Bogotá: Mc Graw-Hill.
- [6] ISO 25000. (2017). Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de <https://iso25000.com/index.php/normas-iso-25000/iso-25012>
- [7] Martínez, D. (2017). Procedimiento de diseño para minimizar el consumo de potencia y los retrasos en WSN. El servier, 95-110.
- [8] Martín, J. M. (2016). MI PC configuración, actualización, mantenimiento y reparación. México: Alfaomega.
- [9] Morales, C. (2017). intel.es. Recuperado el 27 de 08 de 2018, de <https://www.intel.es/content/www/es/es/products/chipsets/desktop-chipsets/x299.html>
- [10] Tokheim, R. L. (2004). Fundamentos de los Microprocesadores. (págs. 100-110), Mexico: McGraw Hill.
- [11] Torrente, C. A. (2018). issuu.com. Recuperado el 20 de Mayo de 2019, de [https://issuu.com/drobbe/docs/presentaci\\_n1.pptx](https://issuu.com/drobbe/docs/presentaci_n1.pptx)
- [12] Villalobos, G. (2018). Sistemas Master. Recuperado el 28 de 08 de 2018, de <https://sistemas.com/sistemas-embebidos.php>.

### 6. Biografías

Adriana Bustamante Almaraz es Licenciada en Informática Administrativa desde 2007. En 2010 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias de la Computación, ambos títulos obtenidos por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2017 obtuvo en grado de Doctora en Tecnología e Innovación Educativa por la Universidad Centroamericana.

Norma Lizbet González Corona es Licenciada en Derecho desde 2003 por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2009 obtuvo el grado Maestra en Derecho por el Centro Universitario del Valle de Teotihuacán.

Susana Esquivel Ríos es Licenciada en Turismo con especialidad en Docencia Turística desde 2002. En 2012 obtuvo el grado de Maestra en Estudios Turísticos, ambos títulos obtenidos por la Facultad de Turismo y Gastronomía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es Doctorante en Estudios Turísticos de la misma Facultad.

Así mismo son Profesoras Investigadoras de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán y forman parte del cuerpo académico: “Estudios ambientales, socioculturales, tecnologías y políticas públicas”. Finalmente han realizado publicaciones y ponencias a nivel nacional e internacional.

Juan Antonio Ramos Nieto, estudiante del último semestre de la Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación presentados en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, se presentó como ponente en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

Marcos Alfonso Briseño Romero, estudiante del último semestre de la Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación presentados en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, se presentó como ponente en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

# Análisis de viabilidad en la implementación del modelo de un servidor FTP para protección de la información y la mejora de los procesos académicos y administrativos

Bustamante, A.<sup>1,a</sup>, González, N.<sup>1,b</sup>, Esquivel, S.<sup>1,c</sup>, Luna, J.<sup>1,d</sup>, Romero B.<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Estado de México  
Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán

<sup>a</sup>abustamantea@uaemex.mx, <sup>b</sup>nlgonzalez6@gmail.com, <sup>c</sup>susanaer\_re83@yahoo.com, <sup>d</sup>plunarx123@gmail.com, <sup>e</sup>kingbrok29@gmail.com

**Resumen**— En la presente investigación se implementa el Modelo de Servidor FTP (por sus siglas en inglés *File Transfer Protocol*), caso de estudio: CUVT se implementa el modelo al observar la problemática de la pérdida de información, derechos de autor y control en los procesos académicos, con el fin de mejorar la comunicación, intercambio de información segura en los procesos académicos. Se explica detalladamente el proceso de implementación del modelo FTP utilizando FileZilla Server. En base al análisis de los resultados adquiridos con el instrumento para la obtención de datos para el estudio de viabilidad, debido a que el 80% de la muestra en comunidad universitaria está a favor de la implementación. El modelo se maneja por versiones, lo cual ayuda a la mejora, conforme al análisis de demanda. El modelo ya ha sido implementado y se comporta de manera estable en la transmisión de información.

*Palabras clave.* Servidor, FTP, Seguridad de la Información, Derechos de Autor.

## 1. Introducción

El 31 de agosto del 2016. El periódico El PAIS coloca como titular. “Dropbox reconoce el ‘hackeo’ de 60 millones de cuentas: cómo saber si la tuya está afectada” y como causante del suceso escribe “El robo de las credenciales a un empleado de la firma en 2012 ha derivado en el ‘pirateo’ masivo del servicio”. (Mendiola, 2016).

El 26 de abril del 2017 la revista EL TIEMPO publica en su apartado novedades tecnología, “Los siete grandes robos de datos 2016”. “Un total de 1.4 mil millones de registros digitales fueron expuestos sin autorización en internet durante el 2016, esto significa que las filtraciones y robos de datos aumentaron con respecto al 2015, según el reporte Breach Level Index de la compañía de seguridad digital Gemalto”. Estos datos están registrados en la página digital y son algunos de los siete casos de robo de datos más grandes.

La red social de citas Adult. FriendFinder presentó el mayor foco de robo de información luego de que su base de datos fuera víctima de un ataque malicioso que expuso más de 400 millones de registros.

Un ataque a la Comisión Electoral de Filipinas robó 77.7 millones de registros. El informe estima que esta infracción se incluyeron hasta las huellas dactilares, sin embargo, funcionarios del país alegaron que el robo de datos no incluyo

la biometría. Su puntuación fue de 9.8 de riesgo (EL TIEMPO, 2017).

En estos casos el robo de la información se generó por ataques directos y los usuarios afectados no pueden exigir que les sea indemnizado el daño que sufrieron ya que al aceptar los términos aceptan que la información ya no es de ellos si no de la institución.

La implementación del modelo se desarrolló gracias a los resultados favorables de la aplicación del instrumento, Obtención de Datos para el Estudio de Factibilidad en la Implementación del Modelo de Servidor FTP caso de estudio Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacan, y con los dichos resultados hacia la aceptación en la creación del modelo se inició el desarrollo gracias a que los materiales necesarios fueron proporcionados por el asesor de la investigación Adriana Bustamante Almaraz que forma parte del claustro de investigación del Centro Universitario.

“En el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán se genera una gran cantidad de información proveniente de los académicos, alumnos, administrativos e investigadores, muchas veces dicha información es confidencial, por lo que surge la propuesta de realizar un servidor FTP para dar sustento y seguridad al almacenamiento de esta información. Actualmente mucha de la información manipulada en el Centro Universitario es almacenada a través de servidores web “nube”. Con la nube o almacenamiento en la red se provee una gran capacidad de almacenamiento, aunque dicho recurso sea de mucha ayuda, también tiene sus desventajas ya que al enviar o subir información a través de esta dejará de tener derechos de autenticidad al igual que de control, puesto que una vez en la red, la información puede ser robada o replicada sin consentimiento. Sin olvidar la amenaza de robo de identidad para acceder a las cuentas de almacenamiento.” (Luna, Romero, Bustamante, 2018). La propuesta de crear un servidor de FTP surge ante la problemática que afecta a la información del Centro Universitario, como el robo de identidad y la seguridad de la información cuando es almacenada en diferentes sitios de proveedores. Como Google drive, One-drive, Mega, 4shared, etc. Y de este modo, perder los derechos de autor. Como en los términos de privacidad de Google dice “Todos los que tengan acceso a esta información

están sujetos a estrictas obligaciones contractuales de confidencialidad y pueden ser sancionados o despedidos si no las cumplen.” (Google, 2018). Surgen riesgos en la seguridad de nuestra información.

## 2. Análisis de viabilidad

Tomando en cuenta los datos mencionados sobre la pérdida de la información y la importancia de dicha información se elaboró el siguiente instrumento aplicado desde Google Forms. (Google Forms, 2018). Se realizó una encuesta para recabar la información deseada con respecto a la aplicación de los elementos en la implementación del Modelo de un servidor FTP para la protección de información, la cual fue proporcionada a David Martínez Martínez, encargado del área de coordinación de Ingeniería en Computación, quién compartió la encuesta por medio de la red social Facebook con 8 ítems a todos los alumnos, profesores e investigadores, dentro del Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán. Como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Aplicación de la Encuesta Fuente de elaboración: propia.

Instrumento para la obtención de datos, estudio de factibilidad del modelo de servidor FTP caso de estudio: Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán

En base al modelo de servidor FTP, se elaboró y aplico un instrumento para la recopilación de datos que servirán como base, bajo los siguientes puntos:

### 1. Desarrollo del instrumento en escala Likert

- Si
- No
- Tal vez

La encuesta consta de 8 ítems, los cuales se muestran a continuación:

1. ¿En qué área te desarrollas en el Centro Universitario?
2. ¿Qué tipo de información genera?
3. ¿Medio de almacenamiento en el cual respaldas tu información?
4. ¿Consideras seguro el medio donde almacenas tu información?
5. ¿Estarías a favor de que en el centro universitario se emplee un modelo de almacenamiento de información?
6. ¿Ha sufrido robo o plagio de tu información?
7. ¿Te gustaría aprender a crear tu propio servidor de almacenamiento?
8. ¿Consideras necesario que en el Centro Universitario se implemente un servidor de almacenamiento personal para alumnos, profesores, investigadores, directivos con propósitos académicos?

La aplicación de la encuesta a la comunidad universitaria permite obtener la estadística directamente desde Google Forms que permite tomar la decisión para el desarrollo del modelo FTP como se muestra en la figura 2. Los ítems clave son el 4, 6 y 8.

Consideras seguro el medio donde almacenas tu información?

23 respuestas

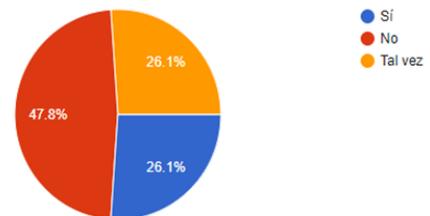


Figura 2. Ítem 4 fuente de elaboración: Google Forms.

En el ítem número 4, la gráfica de pastel presenta el porcentaje total de población, la cual respondió con un 47.8% que “No” consideran seguro el medio donde almacenan su información. Un 26.1% que “Tal vez” y un 26.1% “Si” consideran seguro el medio de almacenamiento.

En la proporción que se presenta la repuesta de “Tal vez”, se toma el 50% del 26.1% que representa en la figura 2, el 50% es igual al 13.05% que consideran seguro su medio de almacenamiento y el otro 50% que consideran inseguro el medio. Sumando dichos porcentajes se tiene que el 60.85% de la muestra considera que el medio de almacenamiento que utiliza no es seguro.

El 60.85% representa más de la mitad de la muestra que aseguran que el medio de almacenamiento que utilizan no es seguro. En la figura 3 se observa el ítem 6 clave para la construcción del Modelo de servidor FTP.

Haz sufrido robo de información o plagio de tu información?

23 respuestas

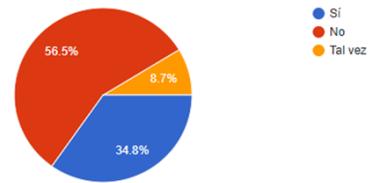


Figura 3. Ítem 6 fuente de elaboración: Google Forms.

Como se puede observar, el porcentaje de respuesta en el ítem 6, el 56.5% dice “No” haber sufrido robo o plagio de su información, más el 4.35% que representa el 50% de los que respondieron “Tal vez”, en total se tiene el 60.85% de la muestra.

En el caso contrario donde la respuesta es “Si”, el 34.8% más el 4.35% que representa el otro 50% que respondió “Tal vez”, es igual al 39.15% de la muestra. Esto es un porcentaje muy alto donde efectivamente se demuestra que si hay robo y plagio de la información.

En el ítem 8 se realizó la propuesta directa sobre la implementación del Modelo de Servidor FTP a la comunidad Universitaria que se muestra en la figura 4.

Consideras necesario que en el Centro Universitario, se implemente un servidor de almacenamiento personal, para alumnos, profesores, investigadores, directivos, con propósitos académicos?

23 respuestas

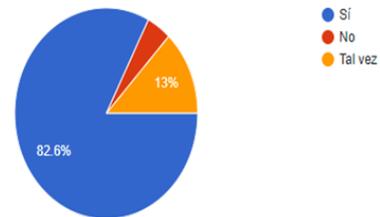


Figura 4. Ítem 8 fuente de elaboración: Google Forms.

Observando la gráfica del ítem 8 se detecta un alto nivel de aceptación hacia la implementación del Modelo de Servidor FTP con un 82.6% sin tomar en cuenta el 6.5% que representa el 50% de aquellos que respondieron con un “Tal vez”. Realizando la suma de los porcentajes el 89.1% está a favor y el 10.9% de la muestra No considera necesario la implementación.

#### A. Análisis y discusión de los resultados del instrumento

Tomando en cuenta los porcentajes de respuesta en los ítems calves 4, 6 y 8, los cuales en base al índice de porcentaje en la aceptación o repudio en la implementación del Modelo de Servidor FTP se obtuvo que el 60.85% considera que su medio de almacenamiento de información “NO” es seguro. El 39.15% ha sufrido robo o plagio de su información. El 82.6% Considera necesario la implementación del Modelo de Servidor FTP, tomando en cuenta la muestra que respondió el instrumento en su mayoría son alumnos, los cuales representan casi el 80% de la comunidad Universitaria, por lo que se llegó a la conclusión de implementar el Modelo de Servidor FTP utilizando múltiples versiones para la posterior mejora de este, por el momento se encuentra en fase de prueba y experimentación de comportamiento antes de lanzar a la comunidad Universitaria la versión 1.0.0.

### 3. Prueba y experimentación del comportamiento del modelo de servidor FTP

El desarrollo del Modelo del Servidor FTP se construyó con los materiales de la tabla 1.

TABLA 1. MATERIAS Y ESPECIFICACIONES.

Equipo	Características
Laptop Asus 17.3	7th-generation Intel Core i7-7700HQ quad-core 2.8GHz (Turbo to 3.8GHz) Discrete NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti 4GB graphics; 1TB 7200RPM HDD and 8GB DDR4 Memory 17.3" Wide view Full-HD Display, 1920x1080 resolution. Wireless Data Network: 802.11AC. Bluetooth 4.1 Red-backlit gaming keyboard with anti-ghosting technology, 1.8mm key travel distance, and N-Key Rollover 3x USB 3.0, 1x USB3.1 Type C (Gen 1), 1x USB 2.0, 1x Microphone-in jack, 1x Headphone-out jack, 1x RJ45 LAN Jack for LAN insert, 1x HDMI, 1x mini Display Port
Hard Disk	1TB de capacidad Hard Disk

Laptop Presario CQ42	Celeron(R) Dual-Core CPU T3330 a 2.00GHz RAM 2.00GB Sistema Operativo a 32-bits
FileZilla	Cliente-Servidor

#### A. Instalación del Modelo de un servidor FTP para protección de la información

La instalación de FileZilla server se realizó consultando y teniendo en cuenta las especificaciones que coloca el manual de instalación (Manual, 2016).

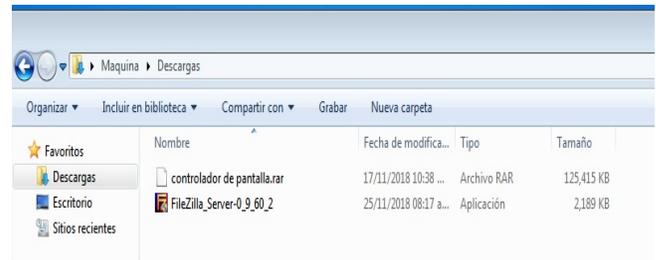


Figura 5. Archivo ejecutable de FileZilla server fuente de elaboración: propia.

#### B. Acuerdo de licencia

En la siguiente ventana se debe aceptar los términos del acuerdo de licencia.

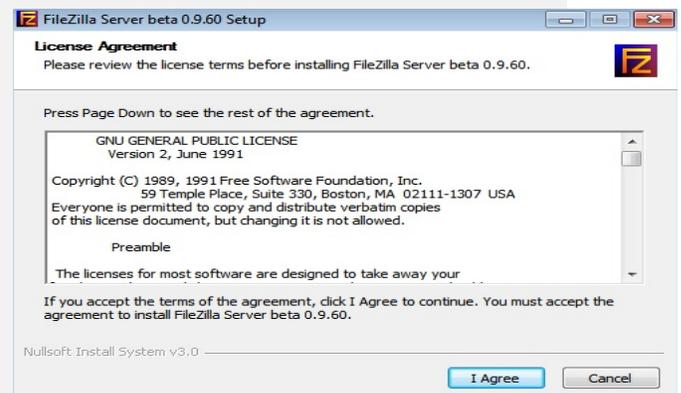


Figura 6. Licencia de uso FileZilla server fuente de elaboración: propia.

#### C. Selección de componentes

Se eligieron las partes y la configuración de servidor de FileZilla que se instaló. Al pasar el puntero sobre una opción, FileZilla mostró una descripción del elemento. También se

seleccionaron idiomas adicionales para que FileZilla trabajara en otro idioma que no sea el inglés.

Los conjuntos de iconos permiten elegir diferentes estilos para los iconos de FileZilla (en parte son aportados por el usuario). La extensión de shell integra FileZilla en el Explorador de Windows.

Dos pequeñas notas sobre la extensión de shell:

1. La instalación o eliminación requiere privilegios administrativos completos.
2. Aunque FileZilla para Windows solo está disponible como versión de 32 bits, contiene una extensión de shell para el shell de 32 bits y 64 bits.

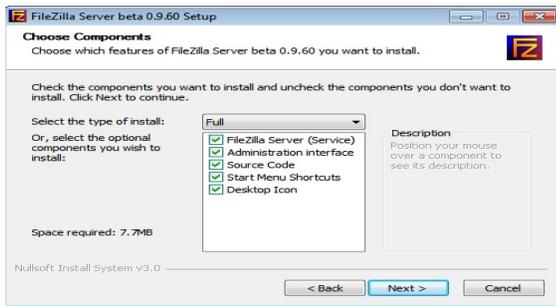


Figura 7. Componentes FileZilla server fuente de elaboración: propia

#### D. Instalar ubicación

En la siguiente ventana se seleccionó la ruta dónde se instaló el programa.

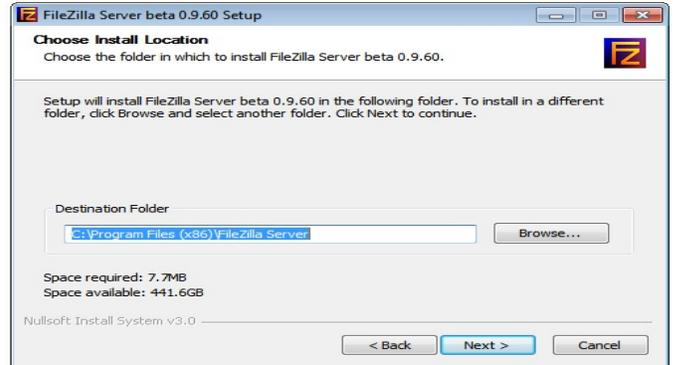


Figura 8. Ubicación de la instalación de FileZilla server fuente de elaboración: propia.

#### E. Inicio de Configuración

FileZilla server seleccionó la forma en la que inicio el servidor por defecto, al igual que la opción para elegir el puerto a utilizar.

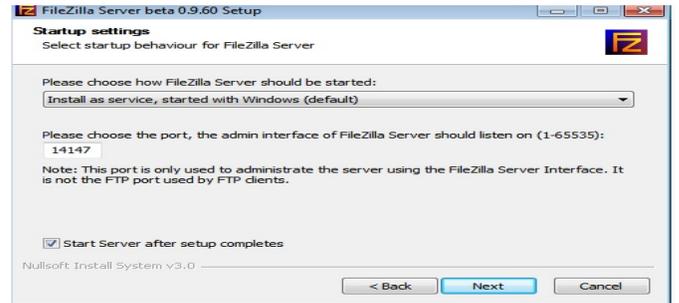


Figura 9. Configuración de ejecución y puerto de trabajo FileZilla server fuente de elaboración: propia.

#### F. Inicio de Instalación

FileZilla se instaló con respecto a la configuración asignada.

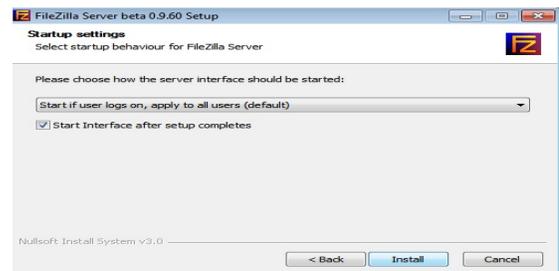


Figura 10. Instalación de FileZilla server fuente de elaboración: propia.

G. Instalación de acabado FileZilla se instaló satisfactoriamente.

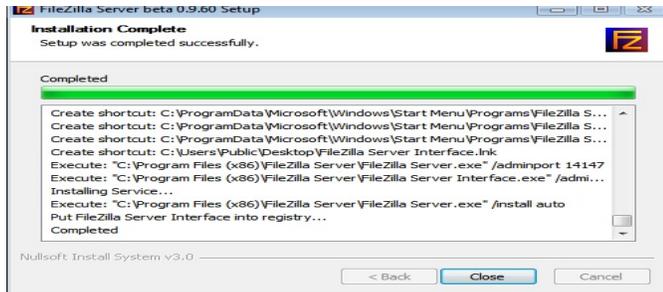


Figura 11. Proceso de Instalación de FileZilla server fuente de elaboración: propia.

H. Interfaz FileZilla.

Al ejecutar el programa se conectó con el servidor, visualizando el puerto, contraseña y host a conectar.

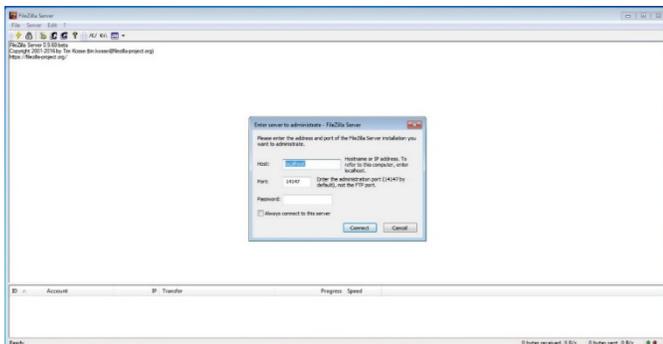


Figura 12. FileZilla server fuente de elaboración: propia.

Con FileZilla ejecutándose se configuro el servidor con un usuario generando una contraseña, el cual accedió desde el cliente y se realizó la transferencia de distintos archivos de manera exitosa. Se han corrido pruebas para implementar SSH (o Secure SHell) para el cifrado de las contraseñas de cada usuario.

Utilizando HTTPS (por sus siglas en inglés Hypertext Transfer Protocol Secure) el modelo de almacenamiento quedó de manera accesible para toda la comunidad Universitaria la cual está a favor de la implementación donde cada archivo o dato seguirá siendo de su autoría y no de la institución.

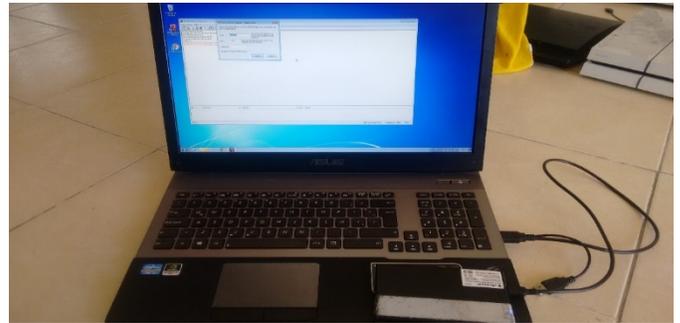


Figura 13. Experimentación del Modelo de Servidor FTP fuente de elaboración: propia

#### 4. Conclusiones

La propuesta del modelo es para uso personal y debe ajustarse a las necesidades de almacenamiento, aunque existen proveedores de este servicio, los usuarios quieren más control y privacidad de sus archivos. Por lo que es necesario continuar con la experimentación y someter el modelo a un trabajo de solicitudes forzado para conocer los límites de este.

Desarrollar las medidas y protocolos de uso para la versión 1.0.0 donde se describirán los términos y condiciones dentro del Centro Universitario al igual que los niveles de almacenamiento permitidos para cada usuario, tiempo de disponibilidad tomando todos estos puntos en cuenta la primera versión del Modelo estará lista a fines de mes de junio del 2019.

#### 5. Referencias

- [1] EL TIEMPO (2017). Los siete grandes robos de datos del 2016. EL TIEMPO Colombia, recuperado de: <https://m-eltiempo.com.cdn.ampproject.org/v/s/m.eltiempo.com/amp/tecnosfera/novedades-tecnologia/loa-siete-grandes-robos-de-datos-del-2016>
- [2] Google (2018) Google privacidad y condición. E.U. Google, recuperado de: <https://policies.google.com/privacy>.
- [3] Google Forms (2018). Instrumento para la obtención de datos, estudio de factibilidad del modelo de servidor FTP caso de estudio: Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacan. México recuperado de: [https://docs.google.com/forms/d/1fSMVXFZ4pDI25P-oAgnYqFqYaXFRYOhmuySMcUHto0w/edit?usp=forms\\_home&ths=true](https://docs.google.com/forms/d/1fSMVXFZ4pDI25P-oAgnYqFqYaXFRYOhmuySMcUHto0w/edit?usp=forms_home&ths=true)
- [4] Luna, Romero & Bustamante (2018). Modelo de un servidor FTP para protección de la información, caso de estudio: Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán. México. En J. Solís (Presidencia), Primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines. Congreso llevado a cabo en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, México.
- [6] Mendiola (2016). Dropbox reconoce el 'hacking' de 60 millones de cuentas: cómo saber si la tuya está afectada. México. EL PAIS, recuperado de:

[https://elpais.com/tecnologia/2016/08/31/actualidad/1472642567\\_500051.html](https://elpais.com/tecnologia/2016/08/31/actualidad/1472642567_500051.html)

[7] Manual (2016). Manual de FileZilla Server. Desarrollado por la Universidad de Jaén, España, recuperado de: <https://www.analfatecnicos.net/archivos/82.FilezillaManualUniJaen.pdf>

## **6. Biografías**

Adriana Bustamante Almaraz es Licenciada en Informática Administrativa desde 2007. En 2010 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias de la Computación, ambos títulos obtenidos por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2017 obtuvo el grado de Doctora en Tecnología e Innovación Educativa por la Universidad Centroamericana.

Norma Lizbet González Corona es Licenciada en Derecho desde 2003 por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2009 obtuvo el grado Maestra en Derecho por el Centro Universitario del Valle de Teotihuacán.

Susana Esquivel Rios es Licenciada en Turismo con especialidad en Docencia Turística desde 2002. En 2012 obtuvo el grado de Maestra en Estudios Turísticos, ambos títulos obtenidos por la Facultad de Turismo y Gastronomía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es Doctorante en Estudios Turísticos de la misma Facultad.

Así mismo son Profesoras Investigadoras de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán y forman parte del cuerpo académico: “Estudios ambientales, socioculturales, tecnologías y políticas públicas”. Finalmente han realizado publicaciones y ponencias a nivel nacional e internacional.

Juan Pablo Luna Luna, estudiante del último semestre de la Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación presentados en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, se presentó como ponente en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

Brayan Alexis Romero, estudiante del último semestre de la Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, ha desarrollado trabajos de investigación presentados en la XII Expo Regional Emprendedora, en la Universidad Autónoma de Tlaxcala en Mayo del 2018, se presentó como ponente en el primer Congreso Nacional de Computación, Informática y Áreas Afines en Octubre de 2018.

# Estudio previo de los factores que han deteriorado de la zona arqueológica de Teotihuacán para el desarrollo software multimedia como herramienta de preservación del patrimonio cultural

Bustamante, A.<sup>1,a</sup>, Esquivel, S.<sup>1,b</sup>, González, N.<sup>1,c</sup> Martínez, R.<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México  
Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán

<sup>a</sup> abustamante@uaemex.mx, <sup>b</sup> susanaer\_re83@yahoo.com, <sup>c</sup> nlgonzalez6@gmail.com, <sup>d</sup> ing.mtzolvera@hotmail.com

**Resumen**— La Zona Arqueológica de Teotihuacán forma parte del patrimonio cultural de la Humanidad desde 1987. Esta zona tiene tres factores principales que han afectado drásticamente tal patrimonio como lo es el turismo masivo, el cambio climático y las atracciones turísticas dentro de la zona arqueológica. Se desarrollará un software multimedia que muestre el cambio que ha tenido la zona a través de un periodo de 10 años (2009-2019). Se llevó a cabo una investigación con alumnos del Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán y así obtener requerimientos para el desarrollo de un software interactivo que tiene como objetivo concientizar a las personas sobre el daño que han sufrido los vestigios.

*Palabras clave.* Teotihuacán, realidad virtual, factores de deterioro.

## 1. Introducción

Hoy en día Teotihuacán es la zona arqueológica más visitada de México [1], se encuentra ubicada a tan sólo 50 km al noreste de la ciudad de México, dentro del municipio de Teotihuacán. Por su belleza fue declarada como patrimonio de la humanidad por la UNESCO desde 1987.

El turismo de hoy en día busca lugares que le permita experimentar nuevas experiencias y conocimientos acerca de la zona que visita, así mismo con el desarrollo multimedia que se implementará, se pretende visualizar un panorama amplio de la historia de la cultura Teotihuacana.

La situación de los factores que están deteriorando la ZAT está creciendo considerablemente a tal magnitud, que aquellos que visitan Teotihuacán se vayan con una impresión errónea del lugar y sus vestigios culturales que lo rodean, por lo cual; si no se implementa este desarrollo multimedia, las personas no podrían visualizar de una manera virtual los factores atractivos turísticos de la zona y conocer las bondades que estos ofrecen; así como los cambios y deterioros que han sufrido a los largo de diez años, por la misma sociedad.

Por ende, es necesario abordar la dimensión del problema a investigar, el cual está siendo de gran interés para los responsables del desarrollo turístico de Teotihuacán, debido a ello la importancia de implementar estrategias innovadoras que realcen la majestuosidad de la zona más visitada de México.

## 2. Factores causantes del deterioro en la ZAT

La Zona Arqueológica de Teotihuacán (ZAT) es una de las más visitadas al año, lo cual provoca que se vea afectada en diferentes factores; por ejemplo el turismo masivo en la temporada de equinoccio de primavera, esta es la fecha donde se recibe más turismo; sin dejar a un lado la época de vacaciones de verano y la temporada decembrina.

En el año 2008 la ZAT, estuvo a punto de ser retirada de la lista de patrimonios de la humanidad, emitida por la Organización de las Naciones Unidas de la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), porque estaban afectando drásticamente los vestigios por el espectáculo de resplandor teotihuacano; haciendo perforaciones con taladro, se colocaron estructuras metálicas, taquetes, cableado y luces en las diversas plataformas de las pirámides del Sol y de la Luna. [2]



Fig 1. Templo de Quetzalcoatl. Fuente propia

Según Falcón [3] esta zona turística; es uno de los sitios arqueológicos con mayor demanda de visitantes a lo largo del año, y períodos vacacionales; recibiendo aproximadamente 4 millones de visitantes al año. Dicha zona se encuentra ubicada en el Valle de Teotihuacán, que lo enmarca una gran diversidad

de vestigios y ruinas, con una historia fascinante detrás de cada una de ellas. A su alrededor existieron diversos ecosistemas que a lo largo del tiempo han sufrido grandes deterioros; por ejemplo, los cerros de las comunidades aledañas a San Francisco Mazapa, San Martín de las Pirámides y Temascalapa, que fueron saqueados extrayendo materiales como cantera, tepetate, grava, arena y tezontle, los cuales fueron extraídos para la construcción del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) y obras públicas.

**2. Metodología**

La metodología a seguir para la implementación del proyecto Teotihuacán en el tiempo 2009-2019, es el modelo de prototipo de ingeniería de software la cual posee las características para el desarrollo multimedia a realizar. Este modelo consta de 5 etapas las cuales se aprecian en la figura 2.

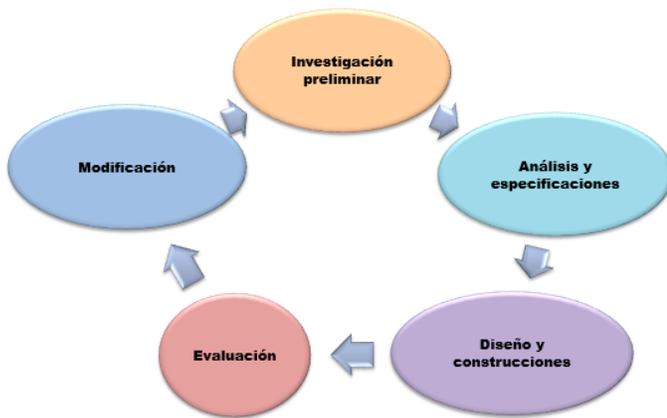


Fig 2. Esquema del modelo de prototipo del software multimedia Teotihuacán en el tiempo 2009-2019. Fuente propia

**A. Investigación preliminar**

En esta etapa se llevó a cabo la investigación documental en el INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia) de la zona arqueológica de Teotihuacán, en un periodo de 10 años (2009-2019). Así como los trabajos relacionados en torno a la investigación en cuestión.

Entre los últimos sucesos arqueológicos más importantes fue en el año 2013, con la colaboración de arqueólogo Sergio Gómez descubrieron el inframundo teotihuacano “El túnel de la serpiente emplumada”, con 100 metros de longitud; este pasaje fue localizado tras 8 meses de excavaciones, este hallazgo ya es posible visitarlo gracias a la tecnología de realidad virtual, en el Museo Nacional de Antropología dentro de la sala Teotihuacana. Samsung ha recreado el túnel tal y como se

encontró, se cuenta con 40 visores y dura ocho minutos la reproducción, aproximadamente. [4].

El museo antes mencionado también cuenta con recorridos virtuales de diferentes culturas indígenas de México, introducción a la antropología, culturas de Oaxaca culturas de la costa del golfo, cultura maya, entre otras.

**B. Análisis y especificaciones**

Se diseñó un instrumento denominado “Teotihuacán en el tiempo 2009-2019: para el desarrollo multimedia” con respecto a los factores que deterioran la zona arqueológica de Teotihuacán, se realizó con alumnos del Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán los días 3, 4 y 5 del mes de junio de 2019.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la instrumento antes mencionado con 14 ítems en escala de Likert, aplicada a una población  $N=342$  que conforma el total de los estudiantes de las licenciaturas: Ingeniería en computación, Informática y Turismo del CU UAEM VT de la cual se obtuvo una muestra estratificada de  $n=181$  estudiantes, considerando un margen de error del 5% y un nivel de confianza del 95%.

TABLA I. MUESTRA LOS ÍTEMES DEL INSTRUMENTO "TEOTIHUACAN EN EL TIEMPO 2009-2019: PARA EL DESARROLLO MULTIMEDIA"

Instrumento "Teotihuacan en el tiempo 2009-2019"	
1.- ¿Vives cerca de la zona arqueológica de Teotihuacán?	Factores que deterioran la Zona Arqueológica
2.- ¿Hace cuánto tiempo visitaste la Zona Arqueológica por última vez?	
3.- ¿Has observado que las atracciones turísticas dentro de la zona han deteriorado los templos del Sol y de la Luna?	
4.- ¿De qué forma has visto que la influencia del turismo ha deteriorado la zona?	
5.- Con la detonación de los cerros para la construcción del nuevo aeropuerto, ¿Has observado que ha sido un factor del cambio climático en el Valle de Teotihuacán?	
6.- Durante tu visita dentro de la zona arqueológica así como a los museos, ¿Has tenido la experiencia de ver una proyección multimedia?	Factibilidad para el desarrollo del software

7.- ¿Te gustaría visualizar un proyecto multimedia que muestre los cambios que ha sufrido la zona arqueológica durante un periodo 2009-2019?
8.- ¿Conoces algún Software con este objetivo?
9.- ¿Piensas que es importante un Software con este objetivo?
10.- ¿Podría este desarrollo multimedia concientizar a la población sobre los daños que ha sufrido la zona?
11.- ¿Te gustaría una interfaz interactiva?
12.- ¿Qué tiempo estimas adecuado para la reproducción del Software multimedia?
13.- ¿Cuánto estarías dispuesto a pagar por una proyección multimedia para mejorar su experiencia?
14.- ¿Le gustaría una proyección virtual con la interacción de dispositivos?

### C. Análisis y especificaciones

Después de la aplicación del instrumento se procedió a realizar la recopilación de datos, mostrando a continuación las gráficas de los items mas relevantes.

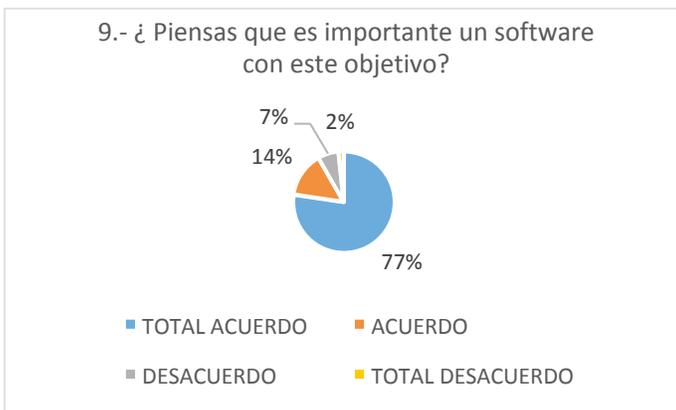


Fig 3. Gráfica que representa que el 64% de la población ha observado que el turismo masivo ha deteriorado la zona tanto ambiental como estructural.

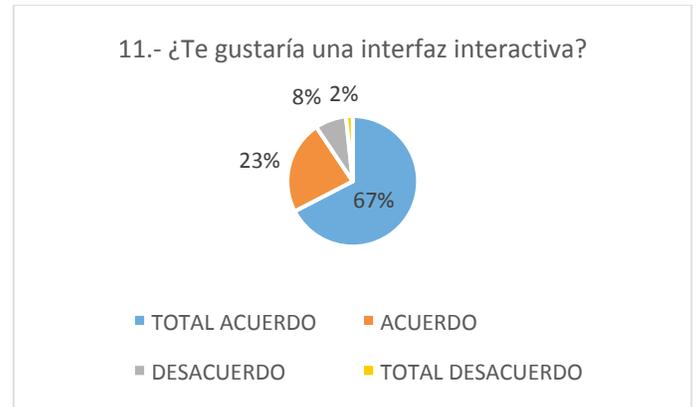


Fig 4. Gráfica que muestra que el 67% de la población quiere visualizar una interfaz interactiva.

### D. Discusión de resultados

De acuerdo con las gráficas se observa que el 69% de la población encuestada vive cerca de la Zona Arqueológica de Teotihuacán, pero solo el 25% la ha visitado hace menos de 4 meses.

El 39% de la población no ha visualizado una reproducción multimedia con el objetivo de presentar los cambios que ha sufrido esta zona arqueológica y al 67% le gustaría visualizar una interfaz interactiva para ser más agradable su visita dentro de la zona arqueológica de Teotihuacán.

El 56% de la población piensa que las atracciones turísticas dentro de la zona han deteriorado los templos y el 64% ha visto que han sido de forma estructural y ambiental.

El 44% de la población estaría dispuesto a pagar \$15 por la reproducción virtual y 69% de la población que indica que la reproducción del software multimedia debe durar entre 15 y 20 minutos.

### 3. Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos del instrumento, es posible poder afirmar que la sociedad tiene presente el daño que ha sufrido los templos del Sol y de la Luna a través de los años por diferentes factores como lo es el turismo masivo.

Con relación a la experiencia que han tenido los visitantes podemos observar que solo han sido experiencias físicas y les gustaría que se implementara un software multimedia dentro de los museos para que su visita sea más agradable entorno a la historia de Teotihuacán. Los usuarios esperan una interfaz didáctica para que muestren interés durante la reproducción. Debido a ello la intención de este proyecto es crear un

desarrollo multimedia, donde los visitantes que acudan a la zona arqueológica vivan una experiencia a través de la historia de este gran vestigio de la cultura Teotihuacana y el proceso de cambio que ha tenido a lo largo del período de 10 años (2009-2019); en ecosistemas, infraestructura, costumbres, clima y gastronomía.

La experiencia con el desarrollo multimedia se mostrarán las ruinas en un antes y al día de hoy, con la implementación de fotografías y sonidos que hará que los visitantes tengan una visión más clara de la cultura teotihuacana.

#### **4. Referencias**

- [1] DATATUR. (2018). Gob.mx. Obtenido de <https://www.datatur.sectur.gob.mx/SitePages/ActividadesCulturales.aspx>
- [2] Rodríguez, A.M. (2009). Teotihuacán puede perder su calidad de patrimonio de la Humanidad, advierten. La Jornada. Recuperado de <https://www.jornada.com.mx/2009/01/03/index.php?section=cultura&article=a04n1cul>
- [3] Falcon, B.R, Esquivel, R. S., & Bustamante, A.A. (Mayo 2019). Turismo, sustentabilidad y cambio climático en el Valle de Teotihuacán. En O. Castro (Presidencia). I Simposio y II Seminario Internacional de la Educación Ambiental y Desarrollo Sustentable. Llevado a cabo en la Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- [4] Ramirez, V. (2018). El Museo Nacional de Antropología te permitirá acceder al túnel de la serpiente emplumada. El Universal. Recuperado de <https://www.eluniversal.com.mx/destinos/explora-el-ultimo-hallazgo-de-teotihuacan-en-realidad-virtual>

#### **5. Biografías**

Adriana Bustamante Almaraz es Licenciada en Informática Administrativa desde 2007. En 2010 obtuvo el grado de Maestra en Ciencias de la Computación, ambos títulos obtenidos por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2017 obtuvo en grado de Doctora en Tecnología e Innovación Educativa por la Universidad Centroamericana.

Susana Esquivel Rios es Licenciada en Turismo con especialidad en Docencia Turística desde 2007. En 2012 obtuvo el grado de Maestra en Estudios Turísticos, ambos títulos obtenidos por la Facultad de Turismo y Gastronomía de la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es Doctorante en Estudios Turísticos de la misma Facultad.

Norma Lizbet González Corona es Licenciada en Derecho desde 2003 por la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2009 obtuvo el grado Maestra en Derecho por el Centro Universitario del Valle de Teotihuacán.

Así mismo son Profesoras Investigadoras de Tiempo Completo en la Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán y forman parte del cuerpo académico: “Estudios ambientales, socioculturales, tecnologías y políticas públicas” . Finalmente han realizado publicaciones y ponencias a nivel nacional e internacional.

Rosa Guadalupe Martínez Olvera es Tesista de la Licenciatura en Ingeniería en Computación en el Centro Universitario UAEM Valle de Teotihuacán, actualmente se encuentra desarrollando el trabajo de investigación: “Teotihuacán en el tiempo 2009-2019: Análisis de factores que deterioran la zona arqueológica a través de desarrollo multimedia”

# DESCRIPCIÓN CARTOGRÁFICA DEL MUNICIPIO DE SANTA CATARINA JUQUILA, OAXACA, MÉXICO.

José Mariano Mijangos Zetina<sup>1</sup>.

Hirvin Gorospe Zetina<sup>2</sup>.

Rodolfo Campos Tenorio<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza. Dpto. de Ingeniería en Agronomía.

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza. Dpto. de Ingeniería Forestal.

<sup>3</sup> Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza. Dpto. de Ingeniería en Agronomía.

## Resumen

El uso de métodos cartográficos consiste en la aplicación de mapas para la descripción, análisis y estudios de diversos fenómenos, con el objetivo de obtener nuevos conocimientos, características e investigación de sus interrelaciones espaciales y su predicción. Lo anterior sirve para la mejor comprensión y el estudio de diferentes fenómenos naturales y socioeconómicos en diversas investigaciones científicas, teniendo en cuenta que los mapas son los modelos temporales y espaciales de la realidad. Es por eso que cada municipio dentro del territorio debe hacer uso de estos métodos con el fin de realizar un diagnóstico situacional de acuerdo a ejes temáticos bien establecidos, los cuales contribuyan al desarrollo integral de dicho municipio y sus habitantes. Por todo lo antes explicado, la siguiente investigación fue realizada en base a fuentes electrónicas y bibliográficas para la interpretación de cada uno de los mapas especificados en el documento, de igual forma se considera que es de gran relevancia dicha información, ya que, con el transcurso de los años los fenómenos que ocurren en la zona han ido cambiando drásticamente. Este artículo busca las oportunidades y los desafíos de la cartografía como metodología para la participación y colaboración en diversas investigaciones que ayuden al desarrollo de los municipios.

**Palabras clave:** desarrollo integral, diagnóstico situacional, interrelaciones espaciales, métodos cartográficos, modelos temporales, municipio.

## Introducción

La Geomática es la ciencia encargada de capturar información, almacenarla e interpretarla; además es la que integra a las demás disciplinas que se encargan del estudio de la forma de la tierra. Es muy importante utilizar esta ciencia ya que nos ofrece unas herramientas que recolectan información geográfica las cuales nos sirven para llevar un debido monitoreo de distintas regiones, la geomática día a día se va extendiendo y su utilización se va convirtiendo poco a poco en algo esencial ya que la disponibilidad del sistema de posicionamiento global, la incorporación de tecnología de

punta para las mediciones y la disponibilidad de imágenes espaciales de alta resolución; implica manejar datos sobre el territorio con un gran detalle espacial y temporal y, por tanto obtenemos información geo - espacial valiosa para usarla en trabajos de urbanismo, agricultura, geología, ordenamiento territorial, etc.

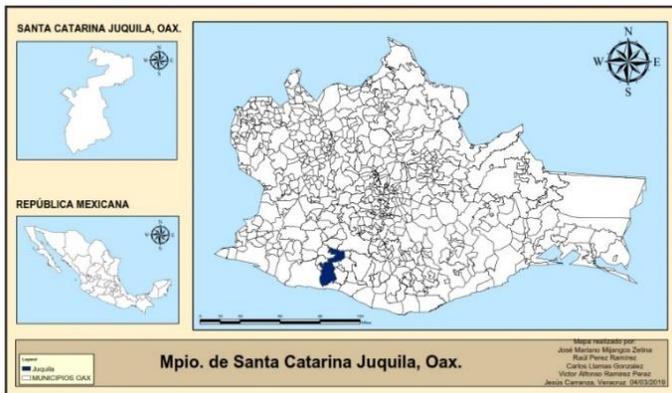
A partir del surgimiento en 1964 del CGIS (Canadá Geographic Information System) considerado como el primer GIS en la historia desde el enfoque de los GISystem, estos han sido usados indiscutiblemente como promotores y complementos en diversas investigaciones alrededor del mundo.

En México en el periodo de 1990-2000 investigadores como los del Colegio de México han elaborado a partir de los SIG obras importantes como: "El Atlas lingüístico de México", "El Atlas de Monterrey" y "La Ciudad de México en el fin del segundo milenio", por citar algunos (López, 2008). La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) compilo información geográfica creando un geoportal para la consulta, visualización y descarga de cartografía temática a diferentes escalas de todo México (CONABIO, 2012), lo anterior permite que mediante los SIG se cumplan los objetivos de posibilitar la caracterización, diagnóstico y planeación de los diferentes tipos de recursos con los que cuenta la nación (López, 2008). Desde otro enfoque de las entidades territoriales, el municipio es el cimiento de la división política territorial pero también de la organización política, administrativa y su población, que le da vitalidad y determina el sustento el cual se ve reflejado en la situación actual en la que se encuentra (Pérez, 2014).

### Materiales y método

El municipio de Santa Catarina Juquila se localiza al sur del estado de Oaxaca, dentro de la región de la costa, en las coordenadas 97°17' longitud oeste, 16°14' latitud norte y a una altura de 1,460 metros sobre el nivel del mar. Limita al noroeste, norte

y noreste con Santiago Minas, al noroeste y este con San Pedro Juchatengo, al suroeste y oeste con San Pedro Tututepec, al suroeste y sur con el Océano Pacífico, al oeste con San Miguel Panixtlahuaca, al oeste y noroeste con San Juan Quiahije, al este con San Juan Lachao, Santiago Yaitepec, Santa María Temascaltepec y Santos Reyes Nopala. Su distancia aproximada a la capital del Estado es de 249 kilómetros. Cuenta con una superficie total de 64062.67 Ha. Ocupa el 0.67% de la superficie del estado y cuenta con 66 localidades, tiene una población total de 14 380 habitantes.



*Ilustración 1. Ubicación geográfica del municipio de Santa Catarina Juquila, Oax. (Mijangos, 2019)*

Para la realización de este trabajo de investigación se utilizó el programa ArcGIS en su versión 10.5, además de hacer uso de recursos cartográficos de las dependencias de INEGI y CONABIO, esto con el propósito de realizar los mapas establecidos dentro de la investigación. Se usó el programa de hojas de cálculo Excel para la elaboración de las gráficas correspondientes.

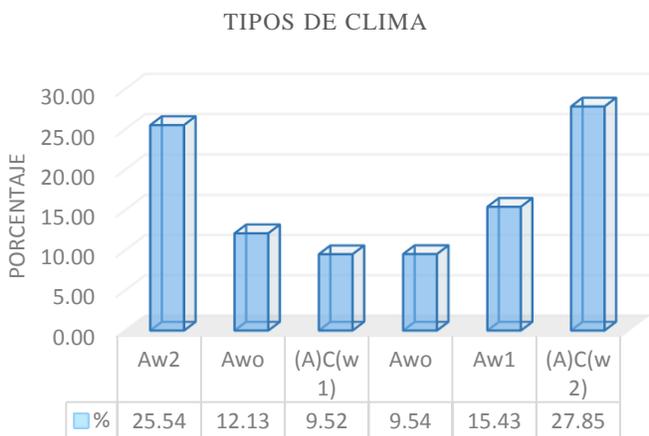
Se realizó, además, una ardua investigación en distintas fuentes bibliográficas y electrónicas para la realización de este trabajo, puesto que se hizo una comparación entre las informaciones obtenidas en ArcGis y las encontradas en las fuentes antes mencionadas, esto con el objetivo de encontrar distintas versiones de la información y como ha cambiado con el pasar de los años.

### Resultados y discusión

En el municipio de Santa Catarina Juquila, la temperatura oscila entre los 10° - 22° C, presenta una precipitación de 800 a 2500 mm / anuales.

Los climas predominantes en esta zona son: Cálido subhúmedo (Aw2) con un porcentaje de 25.54% este tipo de clima presenta una temperatura media anual mayor de 22°C y la temperatura más fría en el mes es mayor de 18°C. Cálido subhúmedo (Awo) con un porcentaje de 27.56% tiene una temperatura media anual mayor de 22°C y la temperatura más fría en el mes es mayor de 18°C. Semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w1)) con un porcentaje de 9.52% tiene una temperatura media anual mayor de 18°C, la temperatura del mes más frío es menor de 18°C, y la temperatura del mes más caliente es mayor de 22°C. Cálido subhúmedo (Aw1) con un porcentaje de 15.43% tiene una temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío mayor de 18°C. Semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w2)) con un porcentaje de 27.85% tiene una temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C.

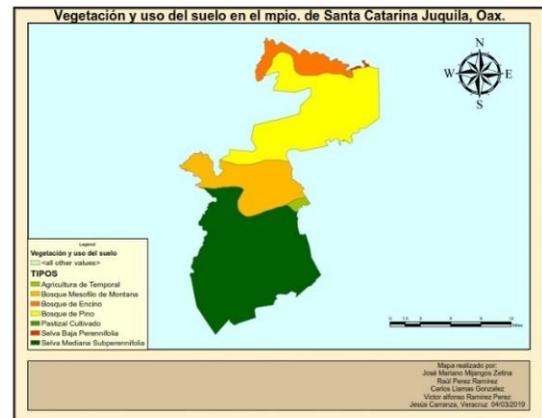
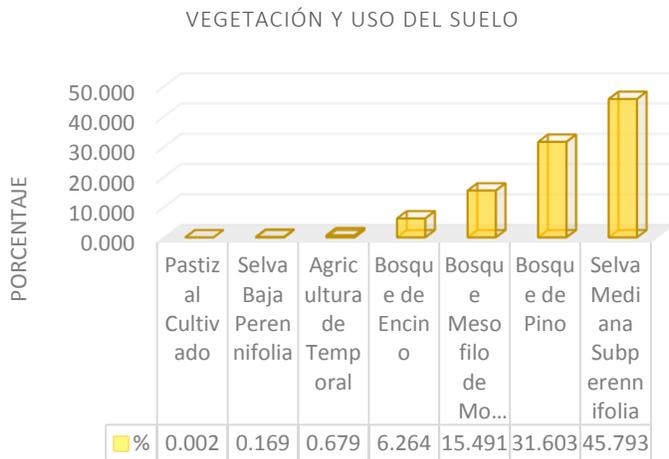
**TABLA 1. TIPOS DE CLIMA.**



**Ilustración 2. Tipos de climas predominantes en el municipio de Santa Catarina Juquila, Oax. (Mijangos, 2019)**

Dentro de la vegetación y uso del suelo encontramos que en el municipio existe pastizal cultivado (0.002%), selva baja perennifolia (0.169%), agricultura de temporal (0.679%), bosque de encino (6.264%), bosque mesofilo de montaña (15.491%), bosque de pino (31.603%), selva mediana subperennifolia (45.793%).

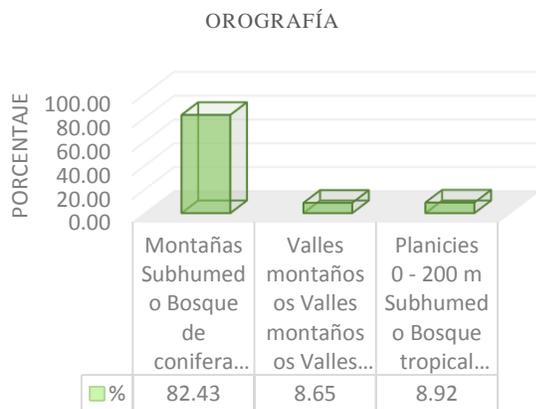
**TABLA 2. VEGETACIÓN Y USO DEL SUELO.**



**Ilustración 3. Vegetación y uso del suelo en el mpio. de Santa Catarina Juquila, Oax. (Mijangos, 2019)**

Debido a la localización geográfica que tiene, podemos observar grandes extensiones de terreno, de acuerdo con el mapa, en el municipio encontramos: Montañas subhúmedo bosque de coníferas y de latifoliadas. Bosque mesofilo de montaña (82.43%), valles montañosos, valles montañosos, valles montañosos (8.65%), Planicies 0 - 200 m Subhúmedo Bosque tropical perennifolio y subcaducifolio (8.92%).

**TABLA 3. OROGRAFÍA.**



**Ilustración 4. Orografía del municipio de Santa Catarina Juquila, Oax. (Mijangos, 2019)**

### Conclusiones

El uso de la SIG debería ser considerada en diversos aspectos como un bien público, ya que a partir de este sistema la geografía se ha establecido como la columna vertebral y el componente inevitable en la concepción de los territorios. Como una cadena de consecuencias se constituiría como la plataforma sobre la cual se construye el conocimiento que permite el desarrollo del público en general, específicamente de los municipios que constituyen al país entero.

El presente trabajo ha sido realizado con la finalidad de obtener conocimientos para la mejor comprensión y estudio de los fenómenos que se presentan en el municipio. Durante la previa interpretación de los mapas y la comparación con diversas fuentes electrónicas, se ha detectado que existe un cambio durante los últimos años en la estructura tanto edafoclimática como socioeconómica del municipio.

### **Referencias bibliográficas**

- CONABIO. (2012). PORTAL DE GEOINFORMACIÓN, SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN SOBRE BIODIVERSIDAD, Presentación, Geoinformación. Obtenida el 29 de junio de 2018, de la página electrónica: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- López Morales, C. (2008). La Integración de sistemas de información geográfica. Parte de los servicios de la Biblioteca Daniel Cosío Villegas de El Colegio de México. REencuentro. Análisis de Problemas Universitarios, (51), 83-89. Consultada el 29 de junio de 2018, <http://www.redalyc.org/pdf/340/34005111.pdf>
- Mijangos Zetina, J. M. (2019). Climas del mpio. De Santa Catarina Juquila, Oax. [Mapa]. 1:345,000. "Climas" CONABIO 2012. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (28 de febrero de 2019). Software: ArcGIS [Software GIS]. Versión 10.5 Jesús Carranza, Veracruz: Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, 2019.
- Mijangos Zetina, J. M. (2019). Mpio. De Santa Catarina Juquila, Oax. [Mapa]. 1:980,000. "División Municipal de México 2015" CONABIO 2016. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (04 de marzo de 2019). Software: ArcGIS [Software GIS]. Versión 10.5 Jesús Carranza, Veracruz: Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, 2019.
- Mijangos Zetina, J. M. (2019). Orografía del Mpio. De Santa Catarina Juquila, Oax. [Mapa]. 1:345,000. "El relieve como atractivo natural" CONABIO 2012. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (04 de marzo de 2019). Software: ArcGIS [Software GIS]. Versión 10.5 Jesús Carranza, Veracruz: Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, 2019.
- Mijangos Zetina, J. M. (2019). Vegetación y uso del Suelo en el Mpio. De Santa Catarina Juquila, Oax. [Mapa]. 1:345,000. "Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI (continuo nacional)" CONABIO 2012. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. (04 de marzo de 2019). Software: ArcGIS [Software GIS]. Versión 10.5 Jesús Carranza, Veracruz: Instituto Tecnológico Superior de Jesús Carranza, 2019.
- Pérez, F. (2014). Tipología del Municipio Mexicano para su Desarrollo Integral. Obtenida el 5 de mayo de 2018, de la página electrónica: <http://www.inap.mx/portal/images/pdf/book/tipologiamunmex.pdf>

# Desarrollo de herramienta educativa para el cuidado de plantas o árboles frutales mediante cómputo afectivo

R. Romero<sup>1,a</sup>, J.E. Romero<sup>1,b</sup>, J. H. Puebla<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Computo

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingenierías Mecánica y Eléctrica

<sup>a</sup> rromeroh@ipnh.mx, <sup>b</sup> saile14398@gmail.com, <sup>c</sup> jpuebla@ipn.mx

**Resumen**— El desarrollo y cuidado de la Naturaleza es tema de especial importancia que debe ser tratado de manera primordial; sobre todo si lo que queremos es educar a nuestra sociedad en el cuidado de la naturaleza; para lo cual es indispensable no pasar por alto el contenido afectivo que se tiene por la vida. Es aquí donde es importante lograr que plantas y árboles pueden transmitir las condiciones físicas en las que se encuentran de manera fácil y que mejor forma de hacerlo que a través de una interfaz afectiva que traduzca la falta de agua a un estado afectivo de tristeza; o su crecimiento por medio de un estado de alegría. Así se presenta una técnica que permite mediante interfaces educar a los propietarios acerca del cuidado de plantas y arboles aprovechando los estados emocionales de las personas.

*Palabras clave.* Software educativo, computo afectivo, plantas, arboles, casa habitación.

## 1. Introducción

El diseño de material educativo para el abordaje de problemas ambientales es una consecuencia de la reflexión acerca del impacto en nuestro planeta [1]. En la actualidad existen programas del gobierno para el cuidado del medio ambiente tales como los basados en el conocimiento indígena o los promovidos por la Comisión Nacional Forestal de México [2] [3] y en general la tendencia está presente en toda América latina como el artículo de Becerra y Torres donde se diseña material didáctico para atacar el problema en Tunja Colombia [4]. Algunos investigadores proponen Herramientas de software interactivo con pantallas táctiles para hacer atractivo el sistema [5]. En un ambiente más urbano existen los huertos escolares, que requieren del desarrollo de materiales guiados a estudiantes [6]. Por otro lado el desarrollo de modelos virtuales ha permitido simular el cultivo de árboles frutales [7]; y las páginas web especializadas permiten documentarse acerca del cuidado de plantas [8]. Sin embargo, es inequívoco que aún hay un déficit de aplicaciones que acerque a la persona a considerar a sus plantas o arboles de casa como parte de la familia. Muchas personas en el hogar se esmeran en los cuidados de sus mascotas; entonces, por qué no considerar a sus árboles o plantas con iguales atenciones. Después de todo también nos proporcionan varios beneficios.

## 2. Objetivos y Metas

### A. Objetivo General

*Desarrollar un sistema de cómputo afectivo que traduzca condiciones físicas de una planta a una simulación de estados afectivos que puedan ser reconocidos por un humano.*

Para el cumplimiento de esta meta se interpreta la felicidad con humedad suficiente y tristeza cuando se registra mediante un sensor que la tierra esta seca o con poca humedad. También se toma en consideración la temperatura del ambiente para reflejar enojo, y el nivel de ph se relaciona con el miedo.

### B. Objetivos Específicos

*Desarrollo de módulo de software para interfaces afectiva.*

Se desarrollaron imágenes a manera de emoticones que permiten reflejar los estados de ánimos dependiendo de las lecturas de los sensores de humedad, temperatura y pH.

*Desarrollo de herramienta de aprendizaje para cuidado de plantas y árboles.*

Se desarrolla un software educativo con recomendaciones sobre el cuidado de la planta, con indicaciones que van desde la germinación hasta la cosecha o floración.

## 3. Materiales y métodos

Para el desarrollo del software se requirió de empleo de dispositivos electrónicos para comunicación inalámbrica, tarjetas de desarrollo y diversas plantas y árboles, los cuales durante un año fueron cuidados desde la siembra y germinación hasta la cosecha en algunos casos.

Para el diseño del módulo se procedió bajo la metodología propuesta por Becerra y Torres en [4].

Se efectuó una indagación inicial con aspectos generales que permitió identificar los principales problemas que se tienen en el cultivo de plantas y árboles en hogares de la ciudad de México. En la segunda etapa se realizó la selección del modelo didáctico Educativo con un enfoque de enseñanza-aprendizaje con la finalidad de que las personas se hagan conscientes de su responsabilidad en el cuidado de la naturaleza. En la tercera etapa se estructuró los contenidos del módulo y se presenta información referente a cada uno de los principales problemas durante la siembra, germinación, cuidados en el crecimiento, cosecha y poda. Ver la figura 1.

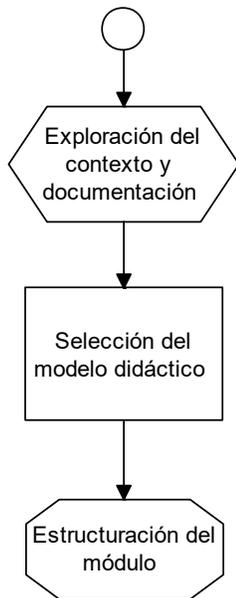


Figura 1. Diseño del sistema.

Para el diseño del modelo didáctico se tomó como referencia el trabajo propuesta por Marqués [9]. El cual consiste en una metodología que contempla 11 etapas:

1. Génesis de la idea.
2. Pre diseño o diseño funcional.
3. Estudio de viabilidad y marco del proyecto.
4. Dossier completo de diseño y marco del proyecto.
5. Programación y elaboración del prototipo alfa – test.
6. Redacción de la documentación del programa.
7. Evaluación interna.
8. Ajustes y elaboración del prototipo beta-test.
9. Evaluación externa.
10. Ajuste y elaboración de la versión 1.0.

Aunque el proceso de elaboración del software educativo parece lineal, es más bien iterativo; ya que, debe comprobarse el funcionamiento y evaluar los resultados, por lo que está sujeto a cambios.

La **idea inicial** de un programa es crear una herramienta interactiva basada en la medición de los sensores de temperatura, humedad y ph. Esta la semilla del **QUÉ** (materia y nivel) para la realización del trabajo. El **CÓMO** (estrategia didáctica); y se desarrolló a medida que se elaboró el primer diseño del programa.

Establecida la idea inicial (idea-semilla); para el **pre diseño** (diseño funcional) se formó un **primer guion del programa**. Se puso énfasis en los aspectos pedagógicos del proyecto: contenidos, objetivos, estrategia didáctica, etc. Para la elaboración del software se consultó distinta fuentes bibliográficas así como a amas de casa y portales dedicados al cuidado de plantas y árboles frutales [ ].

Se proporciona indicaciones para el cuidado de la planta a través de unos diagramas de fácil comprensión; por ejemplo, para la preparación del sustrato se usa la figura 2; y para el procedimiento de crecimiento el diagrama de hidroponía de la figura 2.

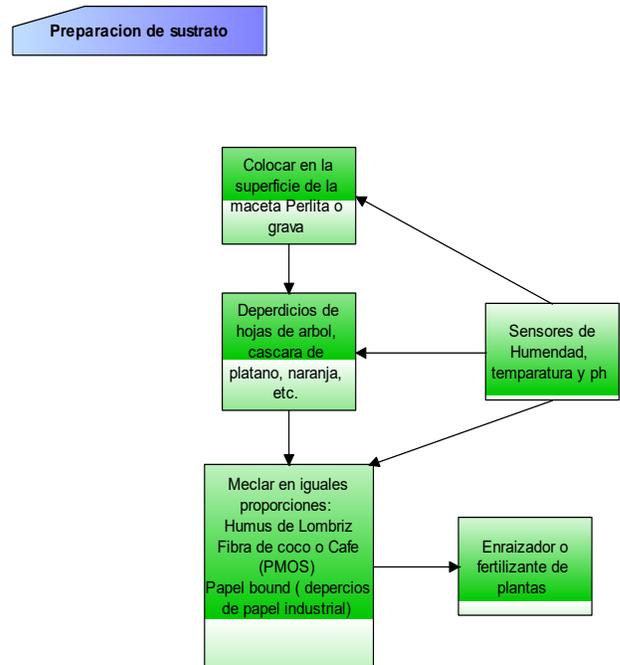


Figura 2. Preparación del sustrato.

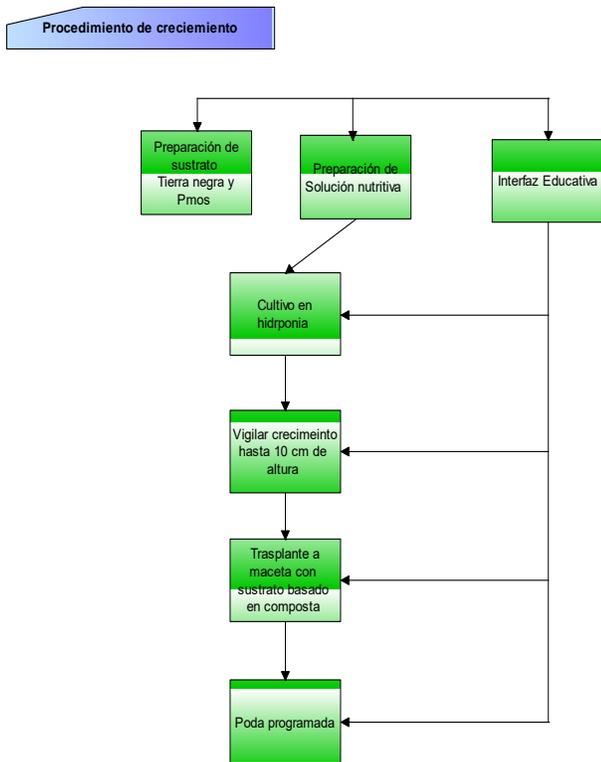


Figura 2. Cuidados durante la hidroponía.

La planta puede comunicar su estado “emocional” mediante la activación de emoticones en gifs animados para presentarse como se observa en la Tabla 1. El mostrar un icono animado resuelve el problema de tratar con números o datos que resultan extraños para el usuario final.

Tabla 1. Emoticones vs Estado afectivo

Emotición	Estado	Sensor
	Felicidad	Humedad
	Enojo	Temperatura
	Tristeza	Humedad
	Miedo	PH

Para obtener los valores de los sensores se usó el sistema de la figura 3. Se empleó un procesador para recuperar la información proporcionada por los sensores; la cual es

procesada para determinar en base las mediciones los estados simulados de emociones. El resultado es transmitido de manera inalámbrica mediante un dispositivo WiFi a un celular, Tablet o PC. Para determinar las emociones correspondientes a las mediciones se usa umbrales, los cuales pueden ajustarse, dentro del sistema embebido.

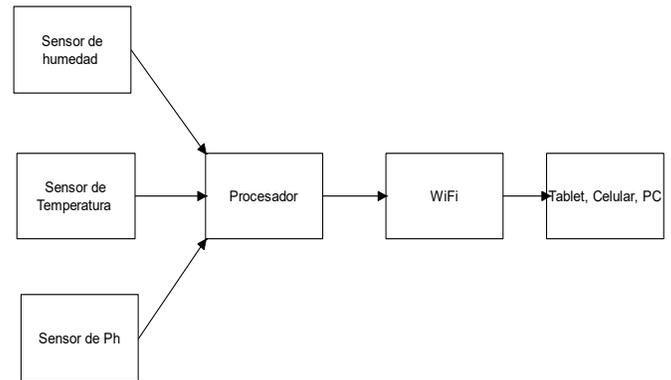


Figura 3. Proceso de sensado.

La figura 4 muestra una de las pantallas generadas; donde se muestra el estado interpretado de la planta mediante una animación en video y un tutorial mediante diagrama a bloques.

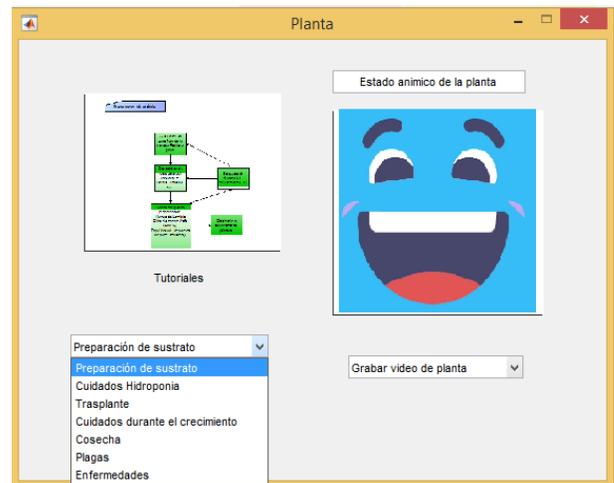


Figura 4. Interfaz principal.

### 3. Resultados

Las pruebas de software que fueron realizadas son unitarias. Pruebas de GUI y Prueba de instalación.

Primero se dividió en módulos para aplicar pruebas lógicas; es decir detección de estilos de aprendizaje, nivel cognitivo y proporción de recurso educativo.

De las unidades seleccionadas se crean los casos de prueba de caja blanca. Para los cuales se definieron valores de entrada

para la detección de los estilos de aprendizaje y la detección de nivel cognitivo. La proporción de recurso educativo se da a partir del estilo de aprendizaje y del nivel cognitivo.

Como prueba de usabilidad se verifica la interacción del usuario con el software en su GUI, por medio de lo cual se asegura que la interfaz proporcione una navegación apropiada a través de las diferentes funciones que se ofrecen. La usabilidad se realizó en base a género, ubicación, edad y nivel de ingresos. Para realizar este estudio se aplicaron cuestionarios a un total de 65 personas.

En la gráfica de la figura 5 se muestra que la mayoría de los personas tiene una opinión buena respecto a la implementación de la tecnología para asistir su aprendizaje y concientización de una problemática; De igual manera la mayoría de los encuestados ha utilizado algún dispositivo móvil como lo son Laptop, Tableta o Smartphone para la búsqueda de información. Las cantidades de veces que se utilizan estas herramientas son entre 30 y 10 veces al mes.

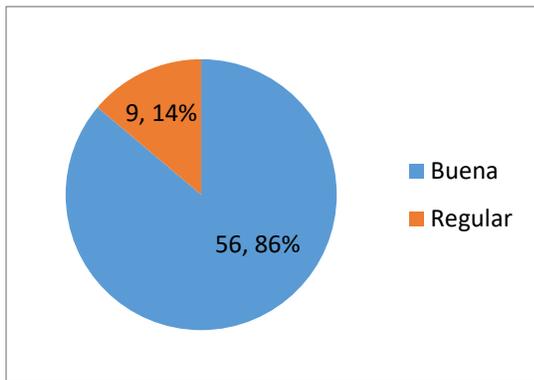


Figura 5. Opinión de las personas entrevistadas respecto al uso de la tecnología.

En la gráfica de la figura 6 se observa que la mayoría (67.7 %) de los encuestados utiliza alguna aplicación para apoyarse en sus actividades diarias. De igual manera el 56.9% está de acuerdo que una aplicación móvil podría ayudarlos a mejorar su rendimiento.

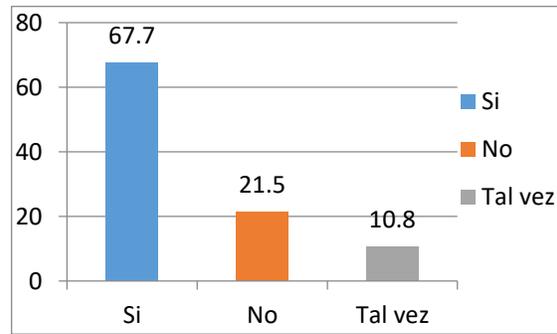


Figura 6. Personas que utilizan aplicaciones para apoyarse en sus actividades.

Con la prueba de instalación se verifica y valida que el sistema se instale apropiadamente en diferentes dispositivos; también se verifico la actualización del sistema.

Algunos de los motivos por los cuales los usuarios utilizaran esta aplicación son:

- Dificultad en la comprensión del cuidado de las plantas o árboles.
- Consideran que sería un apoyo para entender mejor y con mayor facilidad.
- Facilita el desarrollo de la solución del problema.

Por último 87.7% de los entrevistados consideran que si se les proporcionara un recurso para el cuidado de plantas o árboles se beneficiaría el cuidado de la naturaleza y se obtendría un beneficio económico.

Por último y no menos importante es útil observar los resultados obtenidos por las personas que se han beneficiado de lo aprendido mediante el software. De los vegetales se han obtenido cosechas lucrativas de 10 lechugas en promedio por casa habitación. Cosecha de Estevía de 20 plantas en promedio, y generación 30 plántulas de chile pimiento morrón. Arboles con crecimiento de 1 a 1.30 m para manzano, papaya, ciruelo, etc; todos en maceta y peceras si se trata de plantas. Ver figura 7 y 8. Jitomate con producción de 50 frutos cosechados por semana.



Figura 7. Plantas caseras

Figura 8. Árboles en maceta

Se han combatido plagas con éxito para el tomate y hogos para el manzano. Así también se han combatido plagas de babosas, pulgón y hormigas con éxito.

### 3. Conclusiones

Las personas en general tienen una buena opinión respecto al uso de la tecnología computacional como apoyo para el aprendizaje y cuidado de sus plantas y árboles.

Muchas personas usan dispositivos computacionales como computadoras, tablas o teléfonos móviles para fortalecer lo que han aprendido.

Si consideramos la población existente en las ciudades, podemos pensar que con el citado software puede llegar a una gran cantidad de gente y por lo tanto de posibles usuarios que

de acuerdo a los encuestados pueden beneficiarse y mejorar la producción de plantas y árboles.

Todos expresaron sentir gran afecto por la naturaleza después del uso de la aplicación.

### 4. Agradecimientos

Los autores agradecen a Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido.

### 4. Referencias

- [1] J. D. Becerra-Barón and N. Y. Torres-Merchán, "El diseño de material didáctico como aporte al abordaje de los problemas ambientales en entornos educativos y comunitarios," *Revista Educación*, vol. 38, (2), pp. 1, 2014.
- [2] M. Cebrián-de-la-Serna and J. Noguera-Valdemar, "Conocimiento indígena sobre el medio ambiente y diseño de materiales educativos," *Comunicar*, vol. 17, (34), pp. 115-124, 2010;2009.
- [3] A. Molina, "Ensenara pirinola a cuidar los árboles," *El Norte*, 2005.
- [4] J. D. Becerra-Barón and N. Y. Torres-Merchán, "El diseño de material didáctico como aporte al abordaje de los problemas ambientales en entornos educativos y comunitarios," *Educación*, vol. 38, (2), pp. 1, 2014.
- [5] J. P. Chacón et al, "Los contenidos curriculares digitalizados: Voces y silencios en el ámbito editorial/ The digitized curriculum: voices and silences in the publishing field," *Educatio Siglo XXI*, vol. 33, (3), pp. 39, 2015.
- [6] HEZKUNTZA, L.. *Huertos Escolares*. Editorial CEIDA, Centro de educación e investigación didáctica ambiental, España., 1998.
- [7] F. Lescourret et al, "QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development," *Trees*, vol. 25, (3), pp. 519-530, 2011.
- [8] Dávila Sanabria, D. T., Galvis Álvarez, A. C., & Vivas Granados, R. Sitio web como estrategia de enseñanza en la educación para la sostenibilidad. *Praxis & Saber*, 6(11), 115-138, 2015
- [9] ] Mundo Jardinería, <https://www.mundojardineria.com/articulos>, consultado el 06/07/2019.

# Arquitectura Serverless implementada en la creación de un servicio web para una aplicación móvil en un ambiente de producción

F. Ramírez-Felipe<sup>1,a</sup>, A. P. Oliva-Villa<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Depto. de Ingeniería Informática  
<sup>a</sup>francisco.rf@purisima.tecnm.mx, <sup>b</sup>olv.iva.20@gmail.com

**Resumen**—En este trabajo se muestra la arquitectura serverless implementada para la creación de un servicio web, que finalmente será utilizado por una aplicación móvil, la cual fue un proyecto desarrollado para una empresa comercializadora de calzado con la finalidad de agilizar el proceso de levantamiento de pedidos a sus clientes mayoristas

**Palabras clave:** serverless, api rest, aws lambda, servicio web.

## 1. Introducción

La arquitectura serverless es sin duda alguna un tema de actualidad, que durante los últimos meses ha tomado gran auge en el uso e implementación de servicios web, sin embargo, lo primero es aclarar que, si bien su nombre lo dice, serverless (sin servidor) en realidad si utiliza servidores. La diferencia respecto a las aplicaciones tradicionales por ejemplo un servicio web montado en un servidor Ubuntu Server con NodeJS, es que no hay un servidor principal que controle el flujo de la aplicación, sino que los servidores hospedan simplemente servicios que atienden peticiones de forma individual y no están conscientes del flujo de la aplicación, ya que este se controla del lado del cliente. Gracias a esto los desarrolladores no tienen ninguna visión de los servidores que hospedan los servicios, ya que estos son administrados por terceros. Así que los desarrolladores se pueden dedicar exclusivamente a implementar la funcionalidad requerida para sus aplicaciones sin preocuparse por la administración de los servidores.[1] Las arquitecturas serverless benefician en gran medida en la reducción de costos, tiempos y conocimientos requeridos a la hora de desarrollar y publicar un servicio web.[2]

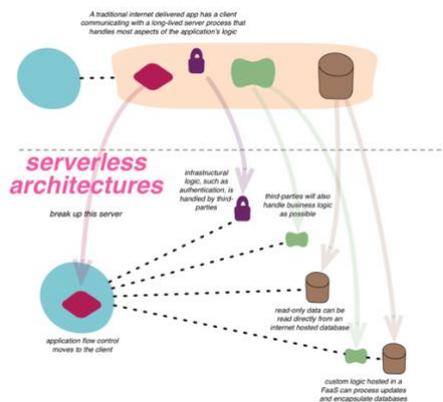


Fig 1. Arquitectura Serverless [3]

## 2. Parte técnica del artículo

Tradicionalmente hemos creado e implementado aplicaciones web en las que tenemos cierto grado de control en las peticiones HTTP que se realizan a nuestro servidor, como es el caso del servidor Ubuntu con NodeJS alojado en alguno de los proveedores de servicios en la nube como Google Cloud. La aplicación se ejecuta en ese servidor y somos responsables de aprovisionar y administrar los recursos necesarios para ella.

Algunos de los problemas que se presentan con esta metodología de trabajo son:

- El servidor genera costos de uso, incluso si no es utilizado el servicio con alguna solicitud del algún cliente.
- La responsabilidad de soporte al servidor es completamente nuestra, así que, si ocurre algún imprevisto, nosotros somos responsables de solucionarlo.
- La escalabilidad también corre por nuestra cuenta, somos completamente responsables de aumentar o disminuir recursos al servidor en caso de ser necesario.

Para pequeños desarrolladores, esto puede ser mucho trabajo para manejar, distrayéndose del trabajo importante como mantener la aplicación en línea, entre otras cosas, incluso ocasionando el contratar a una sola persona para que se encargue de mantener al día el servidor utilizado.

La computación sin servidor (serverless) es un modelo de ejecución en el que el proveedor de servicios en la nube (AWS, Azure, Google Cloud) es responsable de ejecutar un fragmento de código mediante la asignación dinámica de recursos, y cobrando solo por la cantidad de recursos utilizados para ejecutar la función. El código generalmente se ejecuta dentro de contenedores sin estado que pueden ser activados por una variedad de eventos que incluyen solicitudes HTTP, eventos de bases de datos, servicios de colas, alertas de monitoreo, carga de archivos, eventos programados, etc. El código que se envía al proveedor en la nube para la ejecución es generalmente en forma de una función. Por lo tanto, serverless a veces se

denomina “Funciones como servicio” o “FaaS”. Las siguientes son las ofertas de FaaS de los principales proveedores en la nube:

- AWS: AWS Lambda
- Microsoft Azure: Azure Functions
- Google Cloud: Cloud Functions

Mientras que serverless abstrae la infraestructura subyacente al desarrollador, los servidores aun participan en la ejecución de nuestras funciones. Bajo esta arquitectura, serverless, fue desarrollado el servicio web, para el cual se definieron las siguientes rutas (funciones en serverless), que contendría el servicio web. Las funciones fueron las siguientes:

TABLA I. LISTADO DE FUNCIONES DEFINIDAS PARA EL SERVICIO WEB

Método	Función
GET	/cliente/login
POST	/cliente/salt/:usuario
GET	/producto/gettop
GET	/producto/getall
GET	/producto/getall/:criterio
GET	/producto/getbylinea/:linea
GET	/producto/getbyid/:id
GET	/pedido/getall/:idcliente
POST	/pedido/add
GET	/pedidodetalle/getall/:idpedido
GET	/pedidodetalle/getproductos/:idpedido

Para poder crear una aplicación implementando la arquitectura serverless capaz de alojarse en AWS: AWS Lambda de Amazon Web Services, se realizó el siguiente procedimiento.[4] Como primera instancia se instalaron los pre-requisitos, como lo fue NodeJS v6.5 o posterior, seguido de instalar el framework de Serverless con le siguiente comando en la consola o terminal:

```
npm install -g serverless
```

De igual forma se necesitó una cuenta de Amazon Web Services, además de configurar una clave de acceso para el servicio de AWS, esto para utilizarlo como parámetro en la configuración de la aplicación Serverless, la cual sirve para que la aplicación Serverless se conecte directamente a los servidores de AWS, y pueda implementarse bajo nuestra cuenta en el portal.

Ahora con los frameworks necesarios instalados, y las credenciales de proveedor de servicio configuradas, se prosiguió con la creación de la aplicación serverless con lo siguientes comando:

```
mkdir API.REST && cd API.REST
npm init -f
```

Se creó un archivo con extensión json el cual guardo un registro de los paquetes instalados o por instalar en nuestra aplicación serverless.

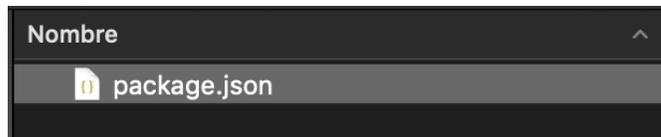


Fig 1. Archivo con extensión .json

A continuación, se instalaron un par de dependencias que son parte fundamental para que la aplicación serverless funcione como es debido. Express y Serverless-http

```
npm install --save express serverless-http
```

Esto nos descargó una serie de dependencias básicas para el desarrollo de la aplicación serverless.

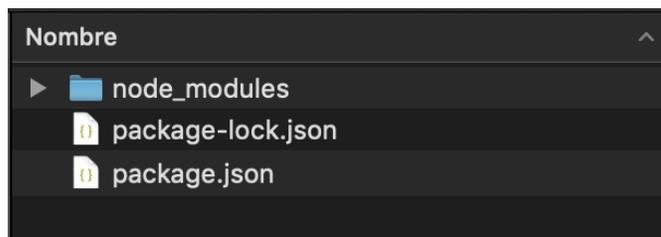


Fig 2. Dependencias generadas por Express y Serverless-http

Posteriormente se creó un archivo llamado *index.js* que contiene el código para la creación de la aplicación serverless. Dicho código sirve para mandar llamar las dependencias de Express, que es un servidor web bajo NodeJS y de Serverless-http que sirve para poder realizar la aplicación serverless.

```
const serverless = require('serverless-http');
const express = require('express');
const app = express();
const sql = require('mssql');
```

En el archivo *index.js* se definieron las rutas antes mencionadas (funciones de serverless), que fueron las direcciones finales a las cuales accedió la aplicación móvil. Por ejemplo la función de login:

```
app.post('/ebony/cliente/login', function (req, res){
  sql.close();
  sql.connect(conString, function (err) {
    if(err) console.log(err);
    var request = new sql.Request();
    request.input('usuario', req.body.username);
    request.input('password', req.body.password);
```

```

    request.execute('stp_clientes_login').then(function
(recordsets, returnValue, affected){
    res.jsonp(recordsets.recordset[0]);
}).catch(function (err){
    console.log(err);
});
});
});
});

```

Por ultimo, el archivo *index.js* contiene el código para exponer todas las rutas al servicio serverless.

```

module.exports.handler = serverless(app);

```

Además del archivo *index.js* se creó otro archivo llamado *serverless.yml*, el cual contiene la configuración necesaria para que la aplicación serverless se conecte e implemente correctamente en el servicio AWS Lambda de Amazon Web Services.

```

service: softwell-service

```

```

provider:

```

```

  name: aws
  runtime: nodejs8.10
  region: us-east-1

```

```

functions:

```

```

  app:
    handler: index.handler
    events:
      -http: ANY/
      -http: 'ANY {proxy+}'

```

Esa fue la configuración necesaria para que el servicio pudiera funcionar, el ultimo paso fue desplegar la aplicación serverless en el servidor AWS Lambda definido con el comando:

```

serverless deploy

```

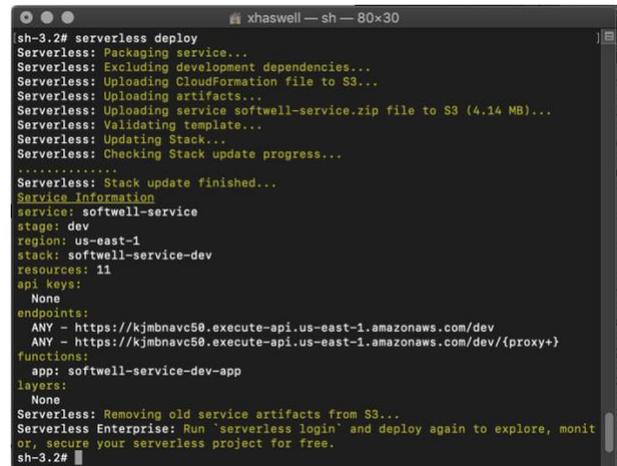


Fig 3. Despliegado de la aplicación Serverless en el servidor AWS Lambda.

Como se puede observar en la imagen anterior, el endpoint (dirección web) final del servicio web publicado bajo la arquitectura serverless es:

```

https://kjmbnavc50.execute-api.us-east-1.amazonaws.com/dev/

```

Por consiguiente, las direcciones finales para cada ruta quedarían formadas de la siguiente forma:

```

endpoint/ + dirección final de cada ruta

```

Por ejemplo

```

endpoint/ + ebony/pedido/add

```

La combinación de todas y cada una de las rutas con el endpoint, son las direcciones a las cuales la aplicación móvil deberá de acceder en sus diversas operaciones.

### 3. Conclusiones

La implementación de la arquitectura serverless en la creación de servicios web, reduce en gran medida el trabajo realizado por el desarrollador, ya que, no solo reduce el tiempo de codificación de un servicio web, si no que también reduce considerablemente los costos de mantener en la nube un servicio con la forma tradicional de hacerlo, un servidor dedicado rentado en alguno de los proveedores de servicios, el cual con características mínimas pero necesarias para que soporte un servicio web oscila entre los 25 y 35 dólares al mes, cabe mencionar que este costo es fijo sin importar si el servicio web es consumido por algún cliente o no, por el contrario, mantener el mismo servicio web con la arquitectura serverless el costo para este mismo proyecto para el cual fue desarrollado el servicio, oscila entre 0 y 0.2 dólares por cada millón de solicitudes a las funciones, y un costo extra de 0.2 dólares por cada millón excedido al mes, con esto, y tomando el cuenta la cantidad de solicitudes que realizaran todos los clientes de la

aplicación final, el costo por mes oscila aproximadamente de 0.4 a 1 dólar mensual.

Con estos resultados, podemos observar que el uso de la arquitectura serverless para la creación de servicios web, una alternativa que si o si se debe de tomar en cuenta por los desarrolladores.

#### **4. Referencias**

- [1] Pedro Galván. (22/Mayo/2018). Un Vistazo a la Arquitectura Serverless. SG, 52, 26.
- [2] Mike Roberts. (2018). Serverless Architectures. 6/Julio/2019, de martinowler.com Sitio web: <https://martinowler.com/articles/serverless.html>.
- [3] Badri Janakiraman. (2016). Serverless. 6/Julio/2019, de martinowler.com Sitio web: <https://martinowler.com/bliki/Serverless.html>.
- [4] Serverless, Inc. © 2019. (2018). Serverless AWS Lambda Guide. 6/Julio/2019, de Serverless, Inc. © 2019 Sitio web: <https://serverless.com/framework/docs/providers/aws/guide/>.

#### **5. Biografías**

L.I. Francisco Ramírez Felipe, Profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, Desarrollador de Software.

Alma Paola Oliva Villa, actualmente es estudiante de la carrera Ingeniería Informática en el Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón.

# Prototipo optomecatrónico para medir índice de refracción de líquidos transparentes

C. Castellanos<sup>a</sup>, J. Camas<sup>b</sup>, R. Grajales, M. Pérez, C. Ríos, J. Gómez

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

<sup>a</sup> castellanosgonzalezp@gmail.com, <sup>b</sup> jcamas@ittg.edu.mx

**Resumen**— En este se presenta un prototipo optomecatrónico que mide índice de refracción de líquidos transparentes utilizando la ley de Refracción de Snell. El sistema presenta un sistema de calentamiento y enfriamiento del líquido cubriendo un rango de temperatura de 15° a 100°, con la finalidad de obtener índices de refracción a temperatura deseada por el usuario. Se comparó los resultados con el reportado en la literatura y los resultados obtenidos validan el correcto funcionamiento del sistema que permitirá caracterizar otras sustancias en relación a su índice de refracción y comportamiento con la temperatura para el desarrollo de nuevas tecnologías.

*Índice de refracción, longitud de onda, temperatura, sistema, opto mecatrónico.*

## 1. Introducción

El índice de refracción es una variable que ofrece información importante sobre la sustancia en particular, como estructura de las moléculas, densidad, comportamiento con relación a la temperatura y longitud de onda de la luz, etc. Ya que el índice de refracción está en función a la temperatura de la sustancia [1] [2] debido a que la luz interactúa con las moléculas de la sustancia [3], esto hace que la velocidad de la luz disminuya. En la mayoría de las sustancias el índice de refracción decrece al aumentar la temperatura debido a que la interacción entre las moléculas se reduce a medida que incrementa la temperatura [4].

Existen técnicas para determinar esta variable como Fraunhofer [5] que mide el ángulo de desviación mínima del paso de luz monocromática de una fuente laser He-Ne. O por interferometría comparando dos mediciones interferométricas y su desplazamiento, una de las cuales se realiza con la sustancia a determinar el índice de refracción [6] [7]. Además de dispositivos portátiles como el refractómetro Abbe, sin embargo, cuenta con limitaciones como las unidades en grados brix [8], por otro lado, las técnicas mencionadas carecen de variación de temperatura en su mayoría, o variación de su longitud de onda, tienden a desajustarse fácilmente o son demasiado caros para su desarrollo.

Sin embargo, medir el índice de refracción por ley de refracción de Snell [9] utilizando una cámara digital para medir las dimensiones y deducir de ellas el índice de refracción [10] parece una alternativa fiable para la determinación de índice de refracción en líquidos incluyendo la variabilidad de la temperatura y longitud de onda para caracterizar el comportamiento de la luz en interacción a la sustancia en función de esas dos variables.

En este trabajo se presenta un prototipo para medir índice de refracción. Este es manipulado a través de una interfaz de usuario donde se le introducen parámetros específicos que necesita el usuario obtener en la medición. Puede medir el índice de refracción como función de la temperatura. Los resultados fueron comparados con el índice de refracción de agua destilada reportadas por otros autores en la literatura.

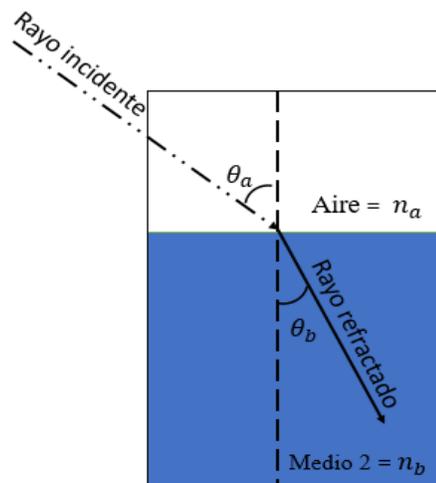


Fig. 1. Ley de Snell

## 2. Parte técnica del artículo

Para determinar el índice de refracción se utiliza la ley de refracción de Snell, la cual describe el comportamiento de la luz con respecto a su velocidad al cambiar de un medio a otro (Fig 1) descrita en la ecuación (1). Siendo  $\theta_a$  el ángulo del rayo incidente y  $\theta_b$  el ángulo del rayo refractado,  $n_a$  el medio exterior y  $n_b$  el medio 2.

$$n_a \text{ sen}\theta_a = n_b \text{ sen}\theta_b \quad (1)$$

Entonces, para determinar el índice de refracción del medio 2, de (1) despejamos  $n_b$  y sabiendo que para efectos de estudio la velocidad de la luz en el aire es la misma que en el vacío [11] [12] [13] la ecuación se expresa en (2)

$$n_b = \frac{\text{sen}\theta_b}{\text{sen}\theta_a} \quad (2)$$

Utilizando un microscopio digital de la marca MicroDirect modelo 44316 y resolución en pixeles de 1080p y una magnificación de 10x a 220x, se toma la imagen de una referencia que se encuentra inmersa en el líquido. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** describe el arreglo experimental que se utilizó para obtener las imágenes. Se utilizó un calentador cerámico, una celda termoeléctrica Peltier y un sensor de temperatura sumergible DS18B20 para el control de temperatura. Esto en contacto con el líquido

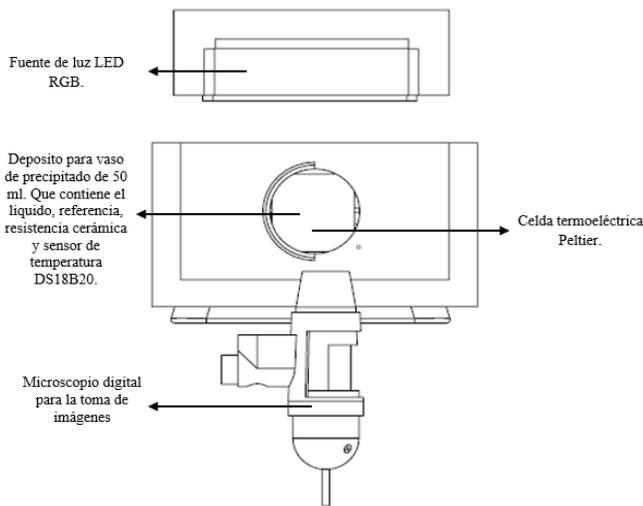


Fig 2. Arreglo para tratamiento de imágenes y obtención de dimensión

contenido en un vaso de precipitado de 50 ml que contiene el líquido. A la imagen obtenida se le aplicó filtros de escala de grises (Fig 3) y binarización (Fig 4), para la fácil detección de



Fig 3. Transformación a escala de grises de referencia

bordes (Fig 5) y determinación de la dimensión de la referencia.

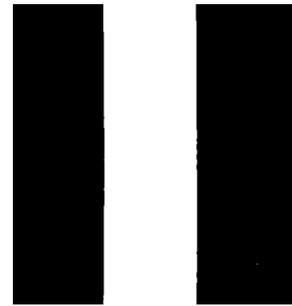


Fig 4. Imagen binarizada de la referencia

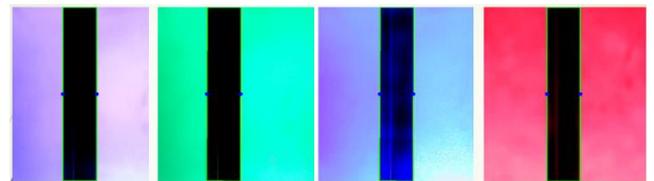


Fig 5. Detección de bordes.

Determinando las dimensiones con tratamiento de imágenes y aplicando ley de refracción de Snell de la ecuación (2) se determina el índice de refracción del medio dos.

Se comparó, con este método, el índice de refracción de agua destilada con los datos de la Tabla I. obteniendo los resultados presentados a continuación.

TABLA I. INDICE DE REFRACCIÓN DEL AGUA [14] [15]

Temperatura (°C)	435 nm	589 nm	632 nm
20	1.34315	1.33336	1.33211
30	1.34205	1.3323	1.33105
40	1.34065	1.33095	1.32972
50	1.33901	1.32937	1.32814
60	1.33714	1.32757	1.32636
70	1.33508	1.32559	1.32438

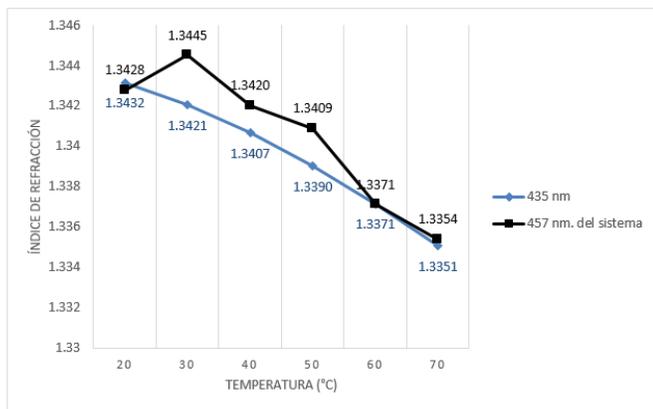


Fig 6. Comparación de mediciones con 457 nm. y 435 nm. de la literatura

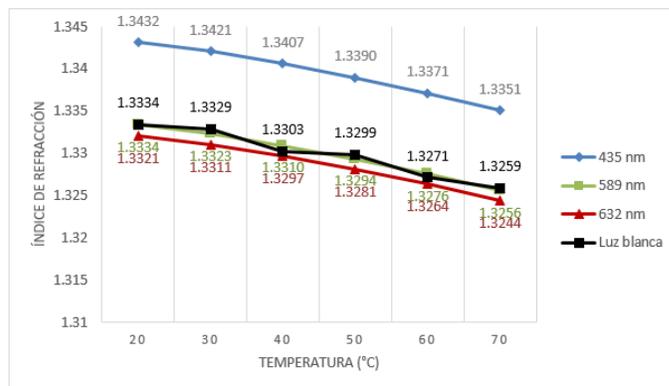


Fig 9. Comparación de mediciones con luz blanca otras longitudes de onda

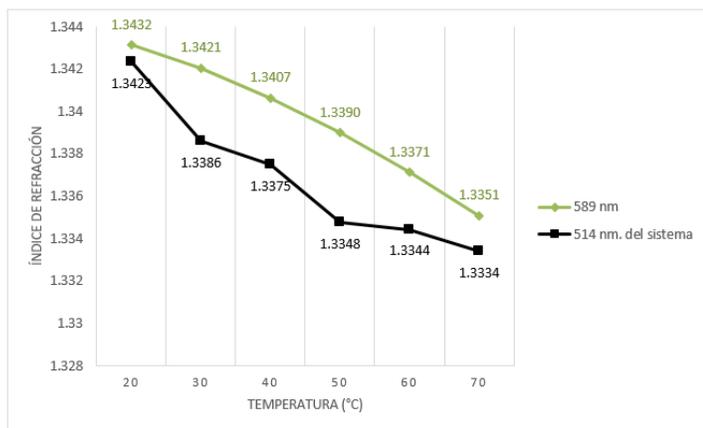


Fig 7. Comparación de mediciones con 514 nm. y 589 nm. de la literatura

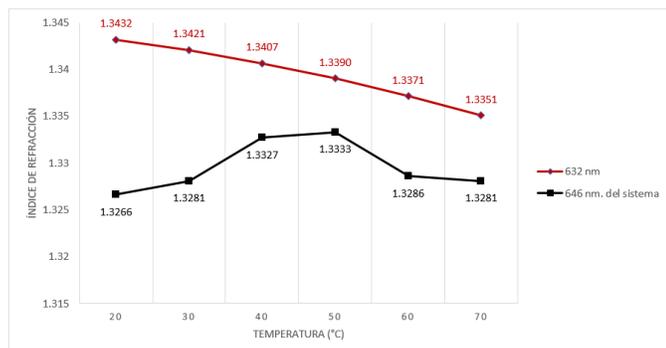


Fig 8. Comparación de mediciones con 646 nm. y 632 nm. de la literatura

### 3. Conclusiones

Los estudios realizados para cuando se hacen mediciones utilizando longitud de onda de 547 y 546 nm. determinan que con estas longitudes de onda son poco precisas y también poco exactas, de estas dos la menos precisa e inexacta es utilizando longitud de onda de 646 nm. Por otra parte, las mediciones realizadas utilizando longitud de onda de 514 nm. presenta una precisión aceptable, sin embargo, la exactitud de aleja de las mediciones de la literatura por 0.006 lo cual no es tolerable. Al medir con luz blanca los estudios arrojan una precisión y exactitud favorable, además de que no se ve afectada la medición de temperatura a temperatura a excepción de 40 y 50 °C donde las pruebas presentaron mayor variabilidad de medición, sin embargo, las mediciones realizadas con luz blanca se mantuvieron en el rango de aceptación. Por tanto, se tiene como alternativa accesible un sistema opto mecatrónico que utiliza ley de refracción de Snell y procesamiento de imágenes con cámara digital para medir el índice de refracción en líquidos a temperaturas de entre 20 y 90 °C utilizando luz blanca como medio de medición.

#### A. Reconocimiento

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el soporte parcial de esta investigación a través del proyecto 6088.19-P y al CONACYT por otorgar beca de Maestría.

#### 4. Referencias

- [1] j. h. gladstone, «on the influence of temperature on the refraction of light.» proceedings of the royal society of london, 1857.
- [2] j. a. n. j. t. wray, «refractive index of several glasses as a function of wavelength and temperature,» optical society of america, pp. 774-776, 1969.
- [3] z.-h. a. x. y.-w. sun, a simple method for the refractive index and dispersion measurements of transparent materials by transmissivity, elsevier, 2017.
- [4] f. koohyar, «refractive index and its applications,» journal of thermodynamics & catalysis, 2013.
- [5] b. a. s. w. h. a. v. r. grange, «refractive index of liquid solutions at low temperatures: an accurate measurement,» optical society of america, 1976.
- [6] r. b. s. a. d. m. j. p. r. f. a. l. b. neto, «determination of absolute values of refractive index of liquids using an interferometric method,» revista de física aplicada e instrumentacao, 2004.
- [7] v. a. s. c.-h. a. l. i. a. r. r. kolchinskiy, «refractive index measurement using the laser profiler,» elsevier, pp. 176–180, 2017.
- [8] s. a. r. p. a. f. o. silva, «refractive index measurement of liquids based on microstructured optical fibers,» multidisciplinary digital publishing institute, 2014.
- [9] e. a. v. j. e. a. t. f. m. a. a. m. l. e. szigety, «medición del índice de refracción del agua usando materiales sencillos,» asociación de profesores amigos de la ciencia eureka, 2009.
- [10] l. g. a. a. j. l. c. a. d. t. g. i. a. d. l. h. r. h. a. g. r. m. a. l. l. a. p. a. g. m. c. s. flores, «prototipo optomecánico para medir índice de refracción utilizando ley de snell,» revista tecnológica digital, 2015.
- [11] c. g. m. santiago burbano de ercilla, física general 31a edición, tébar, 1993.
- [12] p. a. a. m. g. tipler, física para la ciencia y la tecnología: electricidad y magnetismo, luz, física moderna, reverté, 2005.
- [13] e. d. olsen, métodos ópticos de análisis, reverté, 1990.
- [14] d. r. lide, crc handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data, crc press, 1995.
- [15] a. n. a. g. e. a. bashkatov, «water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation,» international society for optics and photonics, 2003.

#### 5. Biografías

Carlos Guillermo Castellanos Gonzalez obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Sistemas computacionales con especialidad en sistemas de información en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Jorge Luis Camas Anzueto obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, su grado de Maestría en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y Electrónica. Obtuvo su grado de doctor en Ciencias con Especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de astrofísica Óptica y electrónica. Ha publicado diversos artículos Nacionales e Internacionales, presentado Conferencias y dirigido varias Tesis de Licenciatura y de Maestría. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, Miembro Estatal de Investigadores Miembro Honorífico, Perfil deseable ante PRODEP desde 2010 a la fecha. Ha escrito 34 artículos de riguroso arbitraje en revistas indizadas en JCR, Escrito 12 artículos en revistas de otros índices, más de 50 memorias de congreso nacional e internacional.

Joel Gómez Pérez es Ingeniero en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2005 y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en 2013. Ha colaborado con la Universidad Politécnica de Chiapas en el área de Ingeniería Mecatrónica. Actualmente es profesor de tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez desde 2010 y colaborador de la Universidad del Valle de México desde 2013. Es miembro del Sistema Estatal de Investigadores desde 2011.

Rubén Grajales Coutiño tiene la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG), Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Óptica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Posteriormente, realizó una estancia Posdoctoral (2 años) en el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, ha publicado 12 artículos de riguroso arbitraje a nivel internacional, más de 20 congresos internacionales. Sus investigaciones están dirigidas en el estudio teórico, numérico y experimental de nuevas arquitecturas de switches ópticos de fibra, en particular interferómetros de Sagnac para el procesamiento digital todo-óptico, la caracterización de trenes de pulsos ópticos ultracortos y el amarre de modos pasivo y desarrollo de láseres de fibra dopada continuos y pulsados ajustables y a múltiples longitudes de onda. Actualmente imparte clases en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Madaín Pérez Patricio obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería en Electrónica en Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, obtuvo su grado de Doctor en Automatización e Informática Industrial por la Universidad de Lille, Francia. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 1, Miembro Estatal de Investigadores Nivel 2, Perfil deseable ante PRODEP desde 2012-2015. Ha escrito artículos arbitraje en revistas indizadas en JCR.

Carlos Ríos Rojas Obtuvo su grado de Licenciatura en Ingeniería industrial Mecánico por el Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, Grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Instituto Tecnológico de Veracruz, Grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica por el Centro Nacional de la Investigación Científica, Lyon, Francia. Investigador estatal nivel 1, Evaluador de proyectos en concursos locales, estatales y nacionales. Línea de especialización: Sistemas térmicos y Transferencia de Calor.

# Desarrollo de un videojuego para ayudar a la rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas en menores

D. Grande<sup>1,a</sup>, D. Morales<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, División de Ingeniería Informática.  
<sup>a</sup> lrs13110069@purisima.tecnm.mx, <sup>b</sup> diego.ml@purisima.tecnm.mx.

**Resumen**—Los videojuegos se han vuelto parte importante y frecuente de la vida diaria de las personas, entrando en áreas como la educación y la salud. Estos han servido como apoyo para la mejora de procesos que antes resultaban complicados o de poco interés para algunos de los involucrados en el mismo. Como parte de esta amalgama entre informática y salud, se desarrolló un proyecto en el cual por medio del concepto de serious games se creó un videojuego el cual sirviera de apoyo para la rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas incorporando tecnologías emergentes como lo es la realidad aumentada.

*Palabras clave.* Realidad Aumentada, Videojuegos, Salud, Rehabilitación, Serious Games.

## 1. Introducción

La informática y la salud han ido de la mano desde la concepción de la primera. Se ha buscado como mejorar procesos y procedimientos por medio de automatizaciones e implementaciones de tecnologías que facilitan el trabajo de los profesionales. Sin embargo, aunque se he han mejorado de forma significativa algunas tareas, estas no han sido totalmente efectivas por razones más correspondientes al error humano. Uno de estos casos es el de la rehabilitación en menores donde, aunque la tecnología ha estado presente desde hace décadas y ha ayudado de sobremano a hacerla más sencilla y efectiva, existen pequeños elementos que en ocasiones merman los resultados que se esperarían obtener. Razones como la falta de interés, atención e incluso miedo en estos menores llegan incluso a anular los beneficios adicionales que dicho proceso ofrecería a los mismo.

Por otra el juego ha ido más allá de simple entretenimiento desde hace siglos, juegos como el ajedrez y el Go han sido utilizados por militares para demostrar la importancia de la estrategia y en la educación para apoyar la retención a corto plazo, coordinación y reconocimiento de patrones [1]. Junto con esto, los videojuegos han sido un elemento que se han incorporado al día a día y también han dejado de ser un simple modo de entretenimiento. Gracias a esta normalización de los videojuegos en nuestra vida se han creado conceptos como los serious games donde los videojuegos se han vuelto herramientas de entrenamiento y educación con utilidades que aún se están explorando.

Por esta razón, fue que se llegó a la decisión de crear un videojuego el cual pudiera ser de utilidad para un área como es la salud y la rehabilitación, específicamente, este videojuego ayudaría con el proceso de rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas.

Basándose en la hipótesis de que un ambiente más entretenido y agradable haría que los menores tuvieran mayor disposición a llevar a cabo el proceso de rehabilitación, se creó dicho videojuego. No se trató de simplemente crear un videojuego que repitiera simplemente los ejercicios que se realizan en una sesión de terapia tradicional, la intención era solucionar el problema de la falta de interés de los menores que reciben este tipo de tratamientos.

Para esto, se hizo uso de herramientas como lo es el Kinect, un dispositivo de Realidad Aumentada que sirvió como plataforma para incorporar al jugador dentro del videojuego, el ambiente de desarrollo de videojuegos Unity, por mencionar algunas herramientas.

## 2. Parte técnica del artículo

Para el desarrollo de este proyecto se tuvieron dos metodologías complementarias que abarcaron todo el proyecto: la metodología formal de un sistema de información (XP) y el método de Cerny [2] la metodología propia del desarrollo del videojuego desde un punto de vista más artístico y creativo. Para llevar a la par ambas metodologías, se creó un nuevo marco de trabajo el cual tomaba puntos similares ambas metodologías los trabajaba como uno solo. Mientras que la primera metodología, la XP, se basaba principalmente en fases, la segunda, la metodología de Cerny, se orientó más a los entregables propios de cada fase como aparece en la Fig. 1.

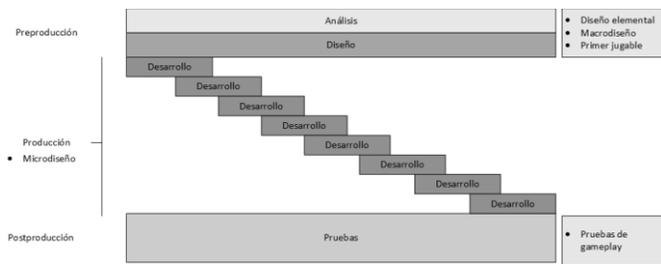


Fig. 1. Combinación de metodología XP y Cerny.

### Análisis

Lo primero que se realizó fue una recolección de información sobre los padecimientos musculoesqueléticos, es decir los relacionados con lesiones tales como fracturas, esguinces y luxaciones. Para esto se tomaron dos bases, una investigación de campo para conocer las afectaciones más comunes en la región y la segunda, una investigación internacional sobre fracturas en menores de edad [3]. Los resultados fueron muy similares pues ambas indicaban a las lesiones de codo como una de las más comunes. Una tercera fuente de información, una investigación sobre la epidemiología de fracturas en un hospital de ISSSTE [4], también mostraba la tendencia hacia dicha área el cuerpo como muestra la Tabla I.

TABLA I. FRACTURAS MÁS COMUNES EN EL HOSPITAL DEL ISSSTE IGNACIO ZARAGOZA (FRAGMENTO).

Sitio afectado	Cantidad	Porcentaje
Humero	1432	32 %
Radio/cubito	1253	28 %

Con esto en mente, se definió esta como la zona de interés y en la cual se enfocarían los esfuerzos y el objetivo del videojuego. Dentro de la investigación de campo, se nos mostró como era el procedimiento de rehabilitación y se nos explicó y otorgó información sobre este proceso, esta información se puede observar claramente dentro de la Tabla II.

TABLA II. INFORMACIÓN OBTENIDA DURANTE LA INVESTIGACIÓN DE CAMPO EN EL DIF SAN FRANCISCO DEL RINCÓN.

Lesiones más comúnmente tratadas en la institución:	Fractura de codo, muñeca y radio.
Tiempo que dura el proceso de rehabilitación:	Entre 5 y 6 semanas.
Sesiones de rehabilitación durante el tratamiento:	Entre 10 a 12 sesiones, dos veces a la semana.

<b>Rango de edad más afectado:</b>	De 3 a 10 años.
<b>Principal problema durante el proceso de rehabilitación:</b>	Falta de cooperación por parte de los menores.

### Diseño

Una vez establecido el enfoque que llevaría se desarrolló un plan de rehabilitación basándose en las recomendaciones del libro *Fisioterapia en Traumatología, Ortopedia y Reumatología* [5].

### Desarrollo

Se creó formalmente el videojuego, para esto se utilizó la herramienta Unity y el lenguaje de programación C#. Aquí se modeló cada uno de los escenarios que conformarían cada nivel, se programó la interfaz con el Kinect y se implementó el dispositivo dentro del juego.

### Resultados Experimentales

Una vez concluido todo el desarrollo, se tenía como resultado un videojuego completamente funcional funcionando de la siguiente manera, como muestra la Fig. 2:

1) El usuario realiza los movimientos frente al dispositivo Kinect. 2) A continuación, mediante los sensores infrarrojos estos perciben el escenario en 3D junto con el usuario. 3) La computadora recibe esta información y 4) es traducida por el SDK de Kinect, es procesada y convertida en vectores legibles y en un esqueleto que representa al usuario. 5) Una vez obtenidos los vectores de dicho esqueleto, el plugin Kinect with Ms-SDK se encarga de leer la información obtenida y dentro del motor de Unity estos se convierten en valores para evaluar y avanzar dentro de la dinámica de cada nivel haciendo avanzar su avatar.

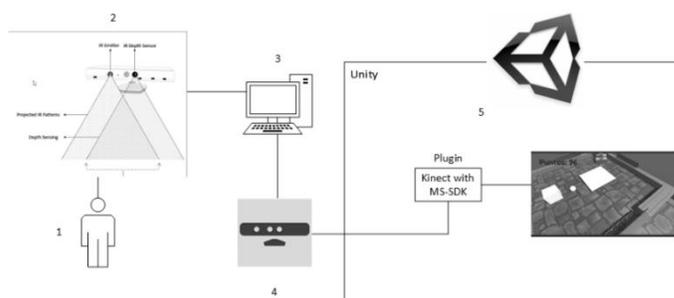


Fig. 2. Esquema del videojuego

El videojuego consta de 4 escenarios principales, estos referenciando las 3 etapas relacionadas con la rehabilitación de la fractura de codo, 1 escenario para cada etapa excepto por la última la cual tendría dos escenarios como indica la Tabla III. Los 4 escenarios serían un calabozo, una ciudad, un campo y un lago. El primer escenario (el calabozo), será el cual se utilizará para las primeras sesiones de inmovilización relativa, motivando los ejercicios de flexo extensión y juntar las manos. El segundo (la ciudad), será para la fase de post inmovilización y motivará el ejercicio de flexoextensión. El tercero (el campo) será para dos ejercicios de recuperación funcional: la extensión de codo y el movimiento basado en supinación. Por último, el lago será para los ejercicios basados en supinación, en pronación y ejercicios pendulares de hombro.

TABLA III. PLAN DE REHABILITACIÓN

Etapas de la recuperación	Ejercicio	Duración
Inmovilización relativa	Juntar las manos.	3 sesiones
	Flexoextensión	4 sesiones
Post inmovilización		
Recuperación funcional	Supinación	5 sesiones
	Ejercicios pendulares de hombro	
	Pronación	
	Natación	

Cada nivel posee una dinámica distinta, sin embargo, todas mantienen la contante de ser juegos orientados a puntajes esto para crear un ambiente de superación continua y mejora la cual produce una actitud competitiva que resulta benéfico para el interés del menor. También para mantener este interés se incluyó también un Sistema de logros, como muestra la Fig. 1, para incentivar una cultura de permanencia pues entre los objetivos esta la repetición de sesiones, completado de fases y terminación de todo el juego.



Fig. 3. Sistema de logros.

### 3. Conclusiones

Una vez que se concluyó el proyecto se obtuvo un videojuego el cual podía ser utilizado e implementado en algún área especializada e incluso en hogares. Todas las estrategias para captar la atención y el interés fueron efectivas, demostrando un mayor interés de los menores. El desarrollar un proyecto como este permitió no solo aprender a crear un videojuego utilizando un enfoque de *serious games* también ayudo a solucionar una problemática local con aplicaciones en escala mayor. También el utilizar una metodología como fue la de Cerny mejoró ampliamente la experiencia del desarrollo de un videojuego. Se mejoraron muchas de las habilidades relacionadas con estas áreas, sin embargo, esto también sirvió para que los responsables aprendieran todo lo relacionado con el área de la salud y tuvieran más cuidado e interés en los aspectos que derivaban de esta área del conocimiento.

Este proyecto fue contemplado como un precedente para el desarrollo de proyectos futuros. El proyecto ha quedado abierto a que nuevos investigadores lo amplíen ya sea agregando módulos o mejorar los ya incorporados. Se espera también pueda ser modificado y ayudar a personas con otros padecimientos e incluso se tiene pensado correcciones en caso de que las investigaciones propias de la medicina y la rehabilitación mejoren los procedimientos establecidos al momento del desarrollo de este proyecto.

### 4. Referencias

[1] D. Michael y S. Chen, *Serious Games : Games That Educate, Train, and Inform*, Boston: Thomson Course Technology PTR, 2006.

[2] M. Cerny [Academy of Interactive Arts & Sciences]. (21 junio 2012), *Method*, Las Vegas: 2002. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=QOAW9ioWAvE>

[3] J. De Pablos y P. González, *Fracturas Infantiles: Conceptos y principios*, Global Help, 2005.

[4] F. G. Mora, J. M. Carriedo, B. B. Bustamante, L. C. Mejía, A. López y S. Hernández, "Fracturas más frecuentes en niños en el Hospital Regional General Ignacio Zaragoza del ISSSTE", *Rev Esp Méd Quir*, vol. 17, n° 3, pp. 175-178, 2012.

[5] M. Serra, J. Diaz y M. De Sance, *Fisioterapia en Traumatología, Ortopedia y Reumatología*, MASSON, 2005.

## 5. Biografías

Diego Sait Grande Camacho. Estudiante y Desarrollador de Software. Estudiante del Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón.

Diego Eduardo Morales López, Ingeniero en Sistemas Computacionales profesor de tiempo completo del Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón Adscrito a la carrera de ingeniería en Informática recién egresado de la maestría en Redes Y Seguridad de la Información

# In the Quest for Random Signals

R. Armenta<sup>1,a</sup>, A. Sotelo<sup>1,b</sup>, Paul A. Valle<sup>1,c</sup>, Luis N. Coria<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Instituto Tecnológico de Tijuana,  
<sup>a</sup> reynaldo.armenta18@tectijuana.edu.mx, <sup>b</sup> asotelo@tectijuana.edu.mx, <sup>c</sup> paul.valle@tectijuana.edu.mx, <sup>d</sup> luis.coria@tectijuana.edu.mx

**Abstract**— In this paper, we present research focused on the development of algorithms to generate time-series based on a pseudo-random algorithm, to avoiding determinism on the time-series. The 0-1 test for chaos algorithm was used to evaluate the determinism properties of the synthetic signals. Signals from nature were analyzed to compare their behavior with synthetic signals. Anything did by an algorithm will produce a deterministic result. No matter the complexity of the algorithm is. Furthermore, it is possible that the algorithms to generate a random number sequence are from chaotic nature.

**Key Words.** 0-1 Test for chaos, Chaos, Deterministic signals, Random Noise,

## 1. Introduction

Random behavior in nature is exhibited in a lot of phenomena. These days, there is no way to predict their demeanor along with the time and space. In this paper, is presented a work trying to find a true random signal based on the deterministic properties of the pseudorandom algorithm implemented in the random function from the Python language.

Random in natural phenomena is defined like that because there is no model to this day able to define and determine their behavior. When the analysis is being performed from this perspective the signals under study are not considered to show a deterministic behavior.

The proposal is to approximate the generation of time-series possessing random behavior based on pseudorandom generation algorithms aiming to reduce the determinism of conventional random implementations.

### A. Determinism

Determinism is a property present in a system, which establishes that there is no randomness involved in the development of the system states. A deterministic model is capable of being reconstructed from the same initial conditions. Unlike the random systems whose next states are unpredictable, in the deterministic systems each future state is determined by the previous one. If there is one or several laws  $\mathcal{L}$  although they are not known for all the instants  $n$ , then the deterministic system satisfies the expression 1 [1]:

$$\exists L \in \forall n \therefore S(n) \leftrightarrow S(n+1) \quad (1)$$

### B. Noise

Noise is defined as an excessive or unwanted signal which potentially results in annoyance. It is an emission of energy that could be caused by a phenomenon that is detected by a sensation of discomfort [1]. In the case of sound waves, noise is the unwanted auditory sensation that corresponds generally to a random variation of the pressure over time. It is a complex signal and can be characterized by the frequencies of the sinusoidal-wise signals that composes it and by the amplitude corresponding to each frequency. If these components are numerous then the noise is characterized by the distribution of the energy in bands of continuous frequencies, defining what is called the frequency spectrum. The frequency spectrum of noise varies randomly over time, unlike other complex sounds that follow a law of precise variation and determinism [2].

### C. White Noise

The white noise, in mathematical terms, is defined as a noise phenomenon which is uncorrelated at all arbitrary chosen pairs of time instants, with a time average autocorrelation function  $R(\tau)$ , which is an impulse and with a power spectral density function (PSD),  $G(f)$ , which is constant over all frequencies [3]:

$$R(\tau) = k\delta(\tau) \quad G(f) = n/2 \quad (2)$$

Because of the constant PSD, the white noise presents a flat amplitude over frequency. Then the white noise is an acoustic signal containing all the frequencies and all of them show the same power [3].

### D. Gaussian Noise

Gaussian noise is a type of statistical noise, which usually possesses zero-mean Gaussian distribution characteristic. The zero-mean property of the distribution allows such noise to be removed by locally averaging values. The Gaussian noise has a probability density function equal to a normal distribution.

Note that Gaussian noise does not have to be white and white noise does not have to be Gaussian. But exists a white Gaussian noise, in which the values at any pair of times are identically distributed and statistically independent [4].

### E. Pseudo-random noise

Pseudo-random noise is a time series that satisfies one or more random statistical tests. A fundamental characteristic of the pseudo-random noise is its deterministic sequence of pulses with a repeatedly period. Like random noise these time series have low correlation, However, these are easy to reconstruct because the generating systems of these sequences contain deterministic patterns which, when handled under the same conditions, the sequence can be reconstructed. Each pseudo-random arrangement is a sequence of  $N$  bit represented by expression 3 [5].

$$d_i \in \{0, n\} \text{ para } i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3)$$

There are applications or tests of systems that need to use a random behavior according to some features of labor but there not exists a way to generate a true random synthetic signal, in those cases, pseudo-random noise generators are the tools that most come close to this type of behavior.

#### F. 0-1 Test of Gottwald

The chaotic signals are those whose properties represent complex systems and dynamic systems which with a high sensitivity of change to different initial conditions, which makes it impossible to predict long-term small variations. However, being deterministic systems, their behavior can be studied in its totality knowing its initial conditions. A property used in chaotic signals is the exponent of Lyapunov which identifies the closeness that exists between two trajectories [6]. The 0-1 test of chaos states that from a periodic two-dimensional system it is possible to identify the behavior of its dynamics, the common example is to obtain two groups based on the same system ( $\phi$ ) with different initial conditions:

$$p_c(n) = \sum_{j=1}^n \phi(j) \cos \cos jc \quad q_c(n) = \sum_{j=1}^n \phi(j) \sin \sin jc \quad (4)$$

To which the mean square displacement is computed to analyze the dynamic under two possible scenarios [7], between a regular or chaotic system, presented in Table I:

TABLE I. 0-1 test for chaos

Underlying dynamics	Dynamics of $p(n)$ and $q(n)$	$M(n)$	K
regular	bounded	bounded	0
chaotic	diffusive	linear	1

## 2. Methodology

### A. Breaking determinism

In the search for random signals, 3 algorithms are presented as proposals with which it is intended to break the determinism of

conventional algorithms, considering the development of these algorithms with a low computational cost to be implemented.

#### -Random Seed

The idea of this algorithm is to obtain a value after the result of planting 5 seeds. The first seed is planted from the current time by the internal clock of the hardware to obtain the first value, that value is used as second seed to obtain a second value, and so on until obtaining a fifth value which is the value that is incorporated in the time series.

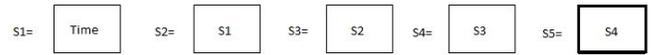


Fig 1. Random seed

#### -Random Swap

This algorithm needs to have in the first instance an array of size  $n$  values generated with the existing pseudo-random algorithms.

Once the array is defined, the values are exchanged at position  $n$  for  $N-n$  where  $N$  is the size of the array, this exchange is at odd positions, and so on until the entire array is traversed. Figure 2 exemplifies the behavior of this algorithm, being the above arrangement the original one and the below one the resultant one.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	2	7	4	5	6	3	9	1

Fig 2. Random swap

#### -Random Slope

This algorithm consists of establishing 3 random seeds in which the values selected for a random series consist in the selection of the point within which a slope intersects in the development of the whole seed, this process is iterated according to the number of elements desired.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2	5	4	6	7	3	8	1	9
9	1	3	7	4	8	6	5	2
1	4	5	3	6	2	9	8	7
1	5	3	3	5	3	6	8	9

Fig 3. Random swap

### B. Nature reference of randomness

In the search for random signals, the algorithms developed are compared with signals that are random in nature and their initial conditions are unknown, as well as the law that governs their behavior. The signals proposed in this study were obtained from different databases, such as the signal of a pulsar, the signal of a weak pulsar [10], the noise of the sun [11], the background noise of the big bang [12], the atmospheric signal [13]. And signals were obtained from environmental sounds recorded through a muffled microphone and the signal generated by the electronics when no microphone was connected. To complement the study, a deterministic signal was generated such as the sinusoidal functions of a component or multicomponent. As an observation, the units of measurement of these signals are unknown, however, this does not influence the implementation of the 0-1 Chaos Test.

### C. Estimation

However, there was no implementation of Gottwald's 0-1 chaos test in Python programming language. Therefore, a translation of the algorithm was performed based on the implementation in MATLAB [7]. Within the implementation it was possible to identify that the correlation function between these languages is different, MATLAB implements linear correlation, while Python implements cross-correlation, considering and adjusting this detail, the results obtained between the two tests were very similar. When the test delivers a value close to one, it means that the signal belongs to a chaotic system or a non-periodic deterministic system. When the value is close to zero, it means that the signal belongs to a non-chaotic system and can be deterministic, for example, a periodic signal.

The analysis requires a data window of at least 1000 points [7] to obtain an accurate result. The 0-1 test is implemented in each of the signals through 200 analysis windows, one hundred of them with a 0% overlap and one hundred others with a 90% overlap.

## 3. Results

Table II shows the 0-1 Test of Chaos results for each of the analyzed signals.

TABLE II. 0-1 Test for chaos Results

Signal	Python-0 % Overlap	Matlab-0% Overlap	Python-90% Overlap	Matlab-90% Overlap
Random Seed	0.9987	0.9980	0.9975	0.9974
Random Swap	0.9973	0.9971	0.9967	0.9978
Random Slope	0.9957	0.9984	0.9962	0.9978
Pulsar	0.9979	0.99803	0.9968	0.9957
Weak Pulsar	0.9973	0.9971	0.9964	0.9956
Sun	0.2664	0.2395	0.2575	0.2482

Big Bang	0.9987	0.9989	0.9985	0.9990
Atmosphere	0.9979	0.9976	0.9980	0.9974
Microphone	0.9698	0.9799	0.9723	0.9787
No Micro	0.9941	0.9948	0.9928	0.9943
Sine	0.0039	0.0038	0.0035	0.0035
Multiple Sine	0.0289	0.0118	0.0281	0.0098

In Table III the result of the whale song is shown, which is a phenomenon produced from a living being, in which two different behaviors were identified, when the whale is singing louder and when is almost in silent.

TABLE III. 0-1 test for chaos Results on Whale signal

Signal	Python-0 % Overlap	Matlab-0 % Overlap	Python-90% Overlap	Matlab-90% Overlap
Whale singing	0.9906	0.9951	0.9950	0.9942
Whale silence	0.0358	0.3125	0.0402	0.0248

The plot in Fig.4 shows the signal from an atmospheric Phenomenon and below of it the chaos test. It is possible to observe the chaos test is near to one, according to Gottwald is a chaotic system.

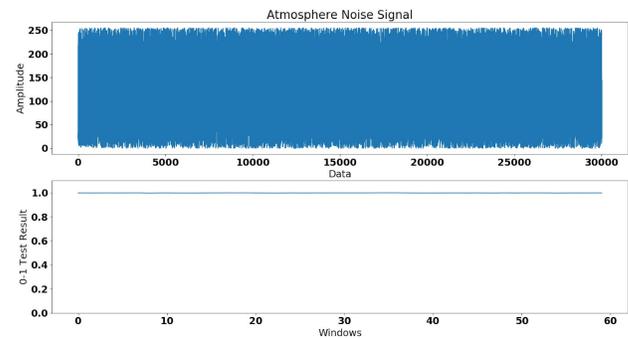


Fig 4. Atmospheric Signal

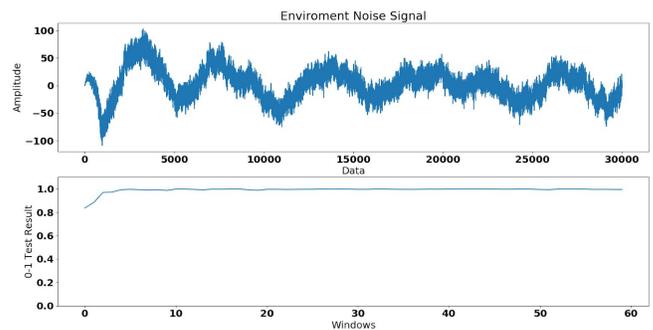


Fig 5. Environment Signal

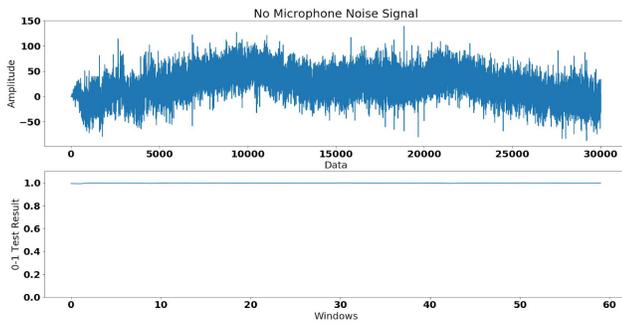


Fig 6. No Microphone Signal

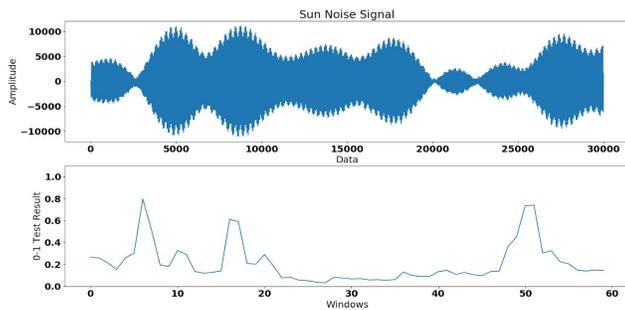


Fig 7. Sun Signal

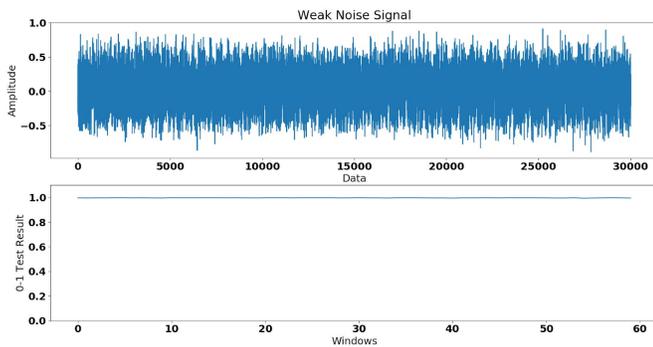


Fig 8. Weak Pulsar Signal

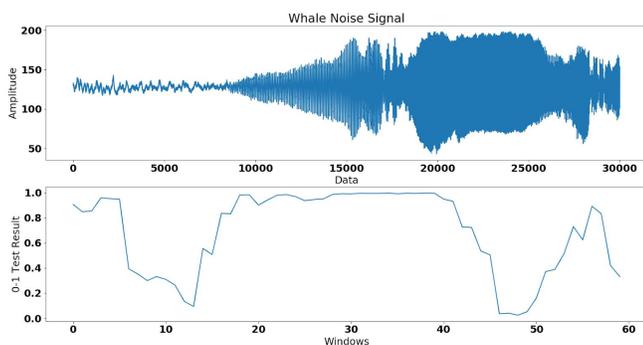


Fig 9. Whales Signal

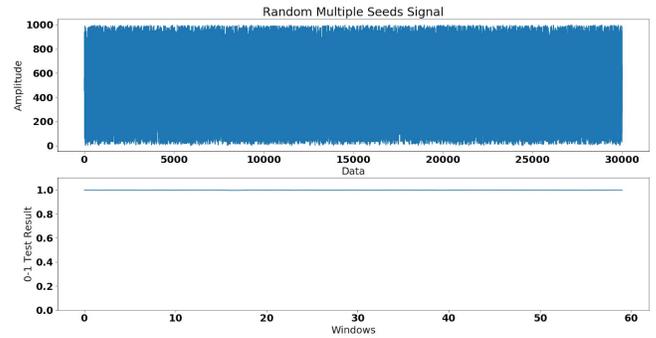


Fig 10. Random Seed Signal

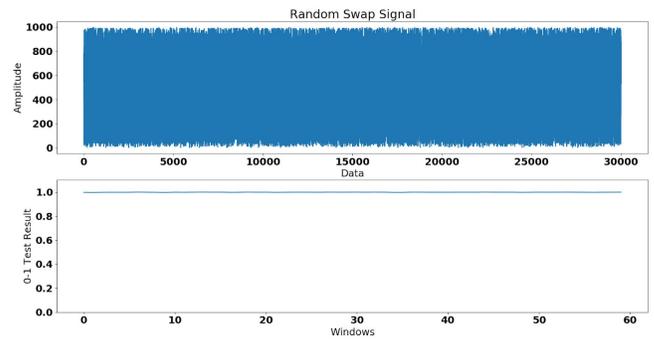


Fig 11. Random Swap Signal

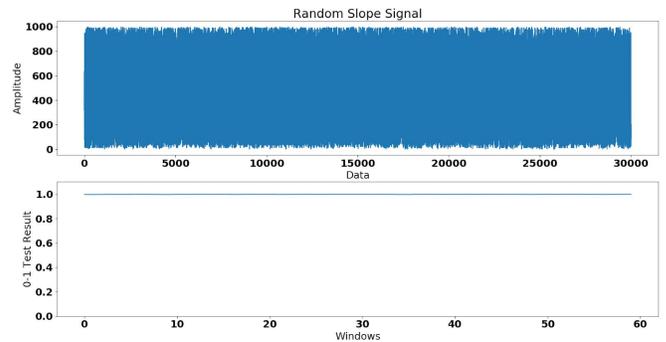


Fig 12. Random Slope Signal

As seen in figures 5, 6 and 8, the behavior of the signal could be interpreted as a non-linear system which can be defined as complex. However, after the analysis of these signals with the test of chaos, chaotic behavior is determined along with these signals. Different results raised after the analysis of the signals presented in figures 7 and 9. The behavior varies as the signal develops; in certain windows the result is chaotic.

The results of the proposed algorithms are presented in figure 10. random multiple seeds algorithm, in figure 11. Random Swap algorithm and in figure 12 Random slope algorithm

#### 4. Conclusions

The selected natural signals, as mentioned, are considered random because there is no model of behavior that governs them as well as ignorance of their initial conditions, however after the results obtained, it is concluded through the proposed test that these signals have a deterministic behavior and could even be considered chaotic, which can be considered that there is a law governing their behavior which until now is unknown.

Based on the results obtained in the random algorithms proposed, the present determinism is impossible to eliminate. Within the test, three algorithms were established to try to break the determinism, however, none of them achieved the stated objective since the results obtained after the test support this characteristic.

On the other hand, it is understood that these pseudo-random algorithms are unpredictable over time but are governed by a determinism which is directly governed by the initial conditions present, so that, after the result obtained from the chaos test, it can be considered that these algorithms have a chaotic behavior.

More tests will be carried out in the future to enrich this research in which, in the first instance, the test of analysis will be replaced by other methods that become useful.

#### 5. References

- [1] E. Catsigeras, "La teoría matemática del caos determinista," p. 12.
- [2] P. N. Breyse and P.S.J Lees, "Noise", Bloomberg of public health, John Hopkins University, pp 1-17, 2006
- [3] R. M. Howard, "White noise: A time domain basis," in 2015 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), 2015, pp. 1–4.
- [4] Rahman, T., Haque, M. R., Rozario, L. J., & Uddin, M. S. (2014). Gaussian noise reduction in digital images using a modified fuzzy filter. 2014 17th International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT)
- [5] Matthews, S. B. (1968). Generation of Pseudorandom Noise Having a Gaussian Spectral Density. IEEE Transactions on Computers, C-17(4), 382–385.
- [6] Gottwald Georg A. y Melbourne Ian, «A new test for chaos in deterministic systems», Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 460, n.o 2042, pp. 603-611, Feb. 2004.
- [7] G. A. Gottwald and I. Melbourne, "On the Implementation of the 0–1 Test for Chaos," SIAM J. Appl. Dyn. Syst., vol. 8, no. 1, pp. 129–145, Jan. 2009.
- [8] "0 - 1 test for chaos - File Exchange - MATLAB Central." [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25050>. [Accessed: 17-May-2019].
- [9] [1] D. Bennett, "Randomness — Deborah J. Bennett | Harvard University Press." [Online]. Available: <http://www.hup.harvard.edu/catalog.php?isbn=9780674107465>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [10] "Pulsar Sounds." [Online]. Available: <http://www.radiosky.com/rsppls.html>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [11] R. Garner, "Sounds of the Sun," NASA, 23-Jul-2018. [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/sounds-of-the-sun>. [Accessed: 20-Jun-2019].
- [12] "Listening to the Big Bang – in high fidelity (audio)," UW News. University of Washington
- [13] "RANDOM.ORG - Audio Noise Generator - Details." [Online]. Available: <https://www.random.org/audio-noise/description/>. [Accessed: 20-Jun-2019].

#### 5. Biographies

R. Armenta: He received the degree of Cybernetics Electronic Engineer with honorable mention "Magna cum Laude" at the Centro de enseñanzas técnica y superior in 2018. Currently is studying the third semester of the Master of Science in Engineering at the Technological Institute of Tijuana with a CONACyT scholarship.

A. Sotelo: He received the degree of Communications and Electronics Engineer from the High School of Mechanical and Electrical Engineering of the National Polytechnic Institute in 1990. He obtained a Master's Degree in Digital Systems from the Digital Technology Development Research Center of the National Polytechnic Institute in 1997 and a Ph.D. Candidate at the Polytechnic University of Valencia, Spain. He is currently a professor-researcher in the Department of Electrical and Electronic Engineering of the Technological Institute of Tijuana.

Paul A. Valle: He received the degree of Electronic Engineer with honorable mention at the Technological Institute of Tijuana in 2010. He obtained the Master of Science in Digital Systems at the Center for Research and Development of Digital Technology of the National Polytechnic Institute, CITEDI-IPN, in the 2012. Concludes the PhD program in Sciences in the area of Biomathematics with honorable mention and recognition for the best academic performance at CITEDI-IPN in 2016. He is currently a tenured professor in the Biomedical Engineering career of the Technological Institute of Tijuana and serves as a Researcher and Coordinator of the Postgraduate in Engineering Sciences. In addition, he is the leader of the Robotics and Control research line, belongs to the National System of Researchers of CONACyT at the Candidate level, has recognition of the Desirable Profile by the DGESEU of the SEP, is a member of the Society for Mathematical Biology and founder of the group of BioMath research.

Luis N. Coria: He received a degree in Electronic Engineering (2000) from Instituto Tecnológico de Durango. He also obtains a Master in Digital Systems (2005) and a Doctorate in Electronics and Communications (2010) from Instituto Politécnico Nacional, with contributions in applied mathematics. He is currently a professor at the Instituto Tecnológico de Tijuana and a member of the Mexican System of Researchers. His current research is focused on applied mathematics over diverse applications of engineering.

# Sistema de Apoyo al Diagnóstico de Cardiopatías Basado en Envelograma Fonocardiográfico Promedio

J. C. Colin-Ortega<sup>1,a</sup>, H. Girón-Nieto<sup>2,b</sup>, C. M. Merino-Arroyo<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica

<sup>2</sup> Universidad Iberoamericana Puebla, Depto. de Ciencias e Ingenierías

<sup>3</sup> Unidad de Quemados anexa a Hospital para el Niño Poblano

<sup>a</sup> juancarlos.colin@iberopuebla.mx, <sup>b</sup> huber.giron2@iberopuebla.mx, <sup>c</sup> carlos.merino@iberopuebla.mx

**Resumen**—La Fonocardiografía es la representación gráfica del sonido del corazón. Los sonidos del corazón humano pueden dividirse en sonidos normales y en sonidos anormales llamados soplos. Estos sonidos son de baja intensidad y frecuentemente son contaminados por otros sonidos indeseables. Existen abundantes trabajos que tratan sobre el procesamiento de los sonidos cardiacos y la eliminación de ruidos espurios. Se plantea que estos sonidos espurios que no provienen del corazón, son minimizados al obtener el fonocardiograma de un único latido, que sea el promedio representativo de todos los latidos contenidos en una muestra de sonido cardiaco. En este trabajo se propone desarrollar un sistema computarizado para procesar una grabación de sonido cardiaco digital, que genere la gráfica de la envolvente del sonido de un solo latido virtual, que representa a todos los latidos de la grabación.

*Palabras clave.* Cardioenvelograma, cardiopatologías, soplos cardiacos, cardiógrafo, fonocardiograma.

## 1. Introducción

A. Antecedentes. Consideraciones sobre la pertinencia y originalidad del proyecto.

La Fonocardiografía es la representación gráfica del sonido del corazón. (1) Los sonidos del corazón humano pueden dividirse en sonidos normales y en sonidos anormales llamados soplos. Estos sonidos son de baja intensidad y frecuentemente son contaminados por otros sonidos indeseables. (2)

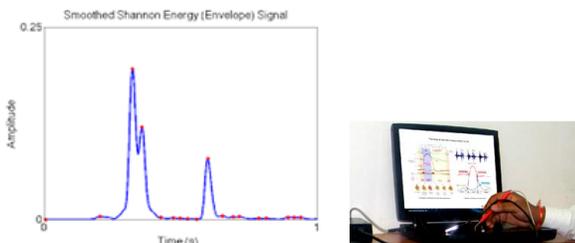


Fig 1. Apariencia aproximada que tendrá el sistema propuesto y tipo de gráfica que se producirá. Foto: Amplelab.com - Scientech. Diagrama: www.semanticscholar.org.

Los sonidos del corazón humano son de baja intensidad y frecuentemente contaminados por otros ruidos indeseables. En una gráfica de sonido cardiaco pueden identificarse ruidos anormales llamados soplos que son indicaciones de patologías. Estos soplos pueden ocultarse por la existencia de ruidos parásitos. (4) (5)

Se propone un método novedoso para clarificar los soplos y minimizar los ruidos indeseables en una grabación digital de sonido cardiaco. Se trata de obtener un promedio del sonido de muchos latidos para generar una gráfica de la envolvente de un solo latido que representa a todos los demás latidos. Existen abundantes trabajos que tratan sobre el procesamiento de los sonidos cardiacos y la eliminación de ruidos espurios. En este trabajo se propone desarrollar un sistema computarizado para procesar una grabación de sonido cardiaco digital, que genere la gráfica de la envolvente del sonido de un solo latido virtual, que representa a todos los latidos de la grabación. Esta gráfica recibe el nombre de “Fonocardiograma”. (3) Es en realidad el “latido promedio” de toda la grabación. Se pretende que los sonidos presentes de forma recurrente en todos los latidos, sean visualizados claramente. Los ruidos parásitos, ambientales o corporales, serán atenuados en la gráfica. Estos algoritmos servirán de base para producir un sistema que será de utilidad para doctores que realizan un primer contacto con los pacientes (cribado) y detectan si sus corazones son normales o presentan patrones sospechosos.

B. Pregunta de investigación.

¿Cuáles son los beneficios adicionales en el proceso de diagnóstico médico, de presentar el fonocardiograma de un solo latido promedio contra el fonocardiograma de toda la serie de latidos particulares de una muestra de sonido cardiaco?

C. Hipótesis.

Los sonidos espurios que no provienen del corazón, son minimizados al obtener el fonocardiograma de un único

latido, que sea el promedio representativo de todos los latidos contenidos en una muestra de sonido cardiaco.

#### D. Objetivo general.

Desarrollar un sistema que recibe una grabación digital de sonido cardiaco de larga duración, y despliega el fonocardiograma promedio de todos los latidos contenidos en la grabación.

#### E. Objetivos específicos.

- Diseñar los algoritmos para detectar latidos, estandarizar duraciones, sumarizar y general envolvente de las señales digitalizadas.
- Desarrollar la infraestructura básica para cargar muestras de sonido y graficarlas en pantalla de computadora.
- Realizar las pruebas del sistema, comparando los resultados con las características del sujeto muestreado, indicadas en la base de datos.

## 2. Métodos

Diseño Top-Down enfocado en el problema. Algoritmos especificados con Pseudocódigo y diagrama de flujo. Programación orientada a objetos y a eventos.

Algoritmos para detectar latidos, estandarizar duraciones, sumarizar y general envolvente de las señales digitalizadas.

Herramientas básicas para cargar muestras de sonido y graficarlas en pantalla. (4)

Batería de Pruebas del sistema, comparando con la información nominal.

#### A. Alcance.

En esta fase del proyecto solamente se trata de diseñar y probar en laboratorio los algoritmos necesarios para este procesamiento de información. La construcción de un sistema completo y su validación con muestras reales serán pasos subsecuentes.

Para la siguiente fase se pretende contar con la primera versión del sistema, probado con muestras digitales de sonido cardiaco disponibles de bases de datos abiertas. Será un sistema para correr de forma aislada en una computadora con sistema operativo popular. No se incluirá control de usuarios ni empaquetamiento para distribución del sistema.

#### B. Beneficios esperados.

La mayoría de la población es atendida por médicos con experiencia y equipamiento limitados. (5) Una herramienta que apoye el diagnóstico del estado del corazón del paciente, tendrá gran valor cuando se realizan revisiones clínicas y se hace una selección de pacientes sanos y de aquellos que presentan alguna anomalía y deben remitirse con un especialista.

#### C. Concepto general del procesamiento.

Una vez cargado el conjunto de valores de una señal, se obtiene la envolvente de los valores absolutos de las muestras digitales de la misma. A esta envolvente se le normaliza su volumen, es decir, las secciones grabadas con menor intensidad, se amplifican y las secciones grabadas con más intensidad se atenúan.

Se localizan los latidos comparando los tiempos que separan a los sonidos notorios, aquellos sonidos notorios que suceden en tiempos aproximadamente regulares serán considerados latidos. A continuación se obtiene una duración promedio de latido.

Cada latido se expande o se contrae (en tiempo) dependiendo si su duración es menor o mayor que la duración promedio. Cada latido ya normalizado en tiempo se va promediando para lograr un latido promedio y visualizarlo en pantalla.

#### D. Interfaz de usuario.

Se conceptualiza como una aplicación de una sola pantalla con tres cajas para gráficos.

La visualización de una señal de larga duración implica una caja de formato horizontal.

Se requiere visualizar

1. la señal original,
2. paralelamente la envolvente de toda la señal, y
3. finalmente el fonocardiograma promedio obtenido, como parte principal de la pantalla, en una caja menos ancha.

#### E. Algoritmos principales.

1. Parsing del documento texto de entrada

Se busca interpretar las líneas de texto del documento con los datos digitales del sonido cardiaco. Al final los datos deben quedar en una estructura apta para procesarse. Por cada

tiempo de un segundo grabado, pueden generarse hasta 20,000 líneas en el documento. Las señales acústicas grabadas son de larga duración (hasta 5 minutos) (6), por lo que se esperan documentos de señal digital de tamaño considerable.

## 2. Detección de envolvente.

Todos los valores se elevan al cuadrado para convertir los negativos en positivos y acentuar las fluctuaciones. Un punto máximo es aquel cuyos dos vecinos son de magnitud menor. Todos los valores entre un punto máximo y el siguiente punto máximo, se rellenan con valores de interpolación (usando la fórmula de la recta entre dos puntos). (7)

El proceso completo puede repetirse más de una vez. Dejar como parámetro el número de “pasadas” que se darán a la señal.

## 3. Normalización de potencia acústica.

Se obtiene el promedio de las magnitudes de la señal completa para obtener el “promedio global”. Se obtiene el promedio de las magnitudes en la primera región del 10% de la señal completa. Si el promedio regional es menor a la magnitud promedio, se deberá aumentar proporcionalmente, el valor del centro de la región.

Si el promedio regional es mayor, se deberá disminuir proporcionalmente el valor central de la región. La segunda región es la que comienza en el segundo valor, es decir se recorre la región solamente un valor y se repite la operación de ajuste del valor central. (8)

Se deben procesar las regiones hasta el final de la señal. Esto no debe procesarse actualizando el mismo arreglo de valores. Se debe generar un nuevo arreglo con los valores ajustados.

## 4. Localización de latidos.

Localizar los latidos es localizar magnitudes más grandes que el vecindario y que se repiten de una manera uniforme en el tiempo a lo largo de la señal. La uniformidad no es perfecta, puede variar, pero no más de un 30% de la duración supuesta de un latido. (9)

Una posibilidad es localizar las primeras dos magnitudes notorias, y con el tiempo que las separa, verificar si hay magnitudes que correspondan a esos intervalos de tiempo a lo largo de la señal. Si no las hay en algún momento en la señal, se descarta la segunda magnitud y se repite el proceso pero con la primera y la tercera magnitudes. Cuando haya magnitudes notorias correspondiendo a esos intervalos de tiempo, entonces se concluye que son latidos y se marcan en un arreglo simultáneo. Otra posibilidad es utilizar una herramienta de reconocimiento de patrones para ubicar los latidos.

## 5. Cálculo de escala individual de los latidos.

Una vez localizados los latidos, se calcula la duración promedio de los latidos. Para cada latido, si dura menos, debe calcularse el factor con el que ese latido debe expandirse hasta lograr la duración promedio. Si el latido dura más que el promedio, debe calcularse el factor con el que ese latido debe contraerse hasta que tenga la duración promedio. Cada latido debe quedar con su factor de escalamiento calculado (10)

## 6. Sumarización de latidos

Con el factor de escala, se procede a generar un latido escalado por cada latido original. Si se trata de expandir, se debe insertar un nuevo valor cada cierta cantidad de valores según el factor, y la magnitud de ese valor será la media de los dos valores entre los cuales se insertará el nuevo valor. Si se trata de contraer, se deberá eliminar un valor de cada determinada cantidad de valores, según el factor.

Una vez que el latido en turno ha sido normalizado en duración (escalado), se procede a incluirlo en una sumarización punto a punto y se repite el proceso con todos los latidos de la señal. Al final esa será la envolvente del promedio de todos los latidos de la señal de entrada.

## 7. Visualización autoajustada de señal

En este módulo, una señal de cualquier duración y de cualquier magnitud máxima, es automáticamente ajustada tanto horizontal como verticalmente para ser desplegada en una caja de la interfaz de usuario. (11)

Por medio de parámetros se puede alterar el escalamiento horizontal y el escalamiento vertical, así como el porcentaje del punto de inicio (scroll) de visualización en la señal.

## 3. Conclusiones

El procesamiento de las muestras de sonido es aceptable en cuanto al costo computacional. A pesar de la gran cantidad de trabajos sobre procesamiento de sonido del corazón, esta forma novedosa de visualizar los sonidos anormales resulta de importante utilidad en el cuidado de la salud humana. Desarrollar este prototipo abre la puerta a la investigación acerca de técnicas innovadoras para reducir la hipotermia de pacientes anestesiados o quemados. Se prevén pruebas en vivo en áreas hospitalarias y desarrollos subsecuentes de prototipos que desemboquen finalmente en la comercialización de esta tecnología, en conjunto con empresas biomédicas y para el beneficio de la comunidad.

## 4. Referencias

- [1] F. Belloni, D. Della Giustina, M. Riva, M. Malcangi. *A New Digital Stethoscope with Environmental Noise Cancellation*. Italia : Comelico, 2010.
- [2] Anita M. McKee, Rafik A. Goubran. *Multisensor stethoscope for chest sound localization*. Carleton University, Ottawa : Dept. of Systems and Computer Engineering, 2005.
- [3] Tauhidur Rahman, Alexander T. Adams, Mi Zhang, Erin Cherry, Tanzeem Choudhury. *Eavesdropping on our Body*. Carolina del Norte : GetMobile, 2015.
- [4] Chenxi Yang, Negar Tavassolian. *Motion Noise Cancellation in Seismocardiographic Monitoring of Moving Subjects*. Hoboken : Department of Electrical and Computer Engineering, Stevens Institute of Technology, 2015.
- [5] Noman Qaid Al-Naggar, Hamdi H. Ghazi. *Design Two- channel Instrument to Record Lung and Heart Sounds at the Same Time, and Separate Them Using ANC-NLMS Algorithm*. Yemen : Facultad de Ingeniería, 2015.
- [6] Ashish HARSola, Sishil Thale, M.S. Panse. *Digital Stethoscope for Heart Sounds*. India : International Journal of Computer Applications, 2011.
- [7] Instruments, Texas. *Digital Stethoscope Implementation on the TMS320C5515*. Texas : Vishal Markandey, 2010.
- [8] Keya Pandia1, 2, Sourabh Ravindran, Randy Cole, Gregory Kovacs and Laurent Giovangrandi. *Motion artifact cancellation to obtain heart sounds from a single chest-worn accelerometer*. Stanford University : Texas Instruments, 2010.
- [9] P Bifulco, GD Gargiulo, G d'Angelo, A Liccardo, M Romano, F Clemente, M Cesarelli. *Monitoring of respiration, seismocardiogram and heart sounds by a PVDF piezo film sensor*. Italia : 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing, 2014.
- [10] Bassiouni, Hassan M. *Phonoarthrography: A New Technique*. Egipto : Al-Azhar University, 2012.
- [11] Ahlstrom, C., Liljefeldt, O., Hult, P. and Ask, P. *Heart sound cancellation from lung sound*. Nueva Jersey : Linköping University Postprint, 2005.

## 5. Biografías

### Dr. Juan Carlos Colin-Ortega (UIAP, México)

Originario de la ciudad de Querétaro, su trayectoria es de 15 años en la industria y 16 años como académico. En la industria ha mejorado procesos y optimizado recursos utilizando como herramienta a las tecnologías de información y comunicaciones y dirigiendo unidades de negocio con orientación al cliente en empresas como Procter & Gamble, ConduMEX e Industrial Minera México. En la academia tiene experiencia en la gestión de servicios, así como en la docencia y la investigación en el área de la Ingeniería Cibernética.

Está diplomado en *Innovación para el aprendizaje, Mejoramiento de la Calidad en el Aprendizaje de la Ingeniería, Ingeniería Cardiovascular, Modelos Matemáticos y Computacionales*. Está certificado como *Technology Specialist* por Microsoft Corporation y como *Evaluador* por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería CACEI.

Tiene los grados de *Ingeniería Electrónica y de Comunicaciones* por la Universidad Iberoamericana Ciudad de México, *Maestría en Ingeniería de Calidad* por la Universidad Iberoamericana Puebla, y *Doctorado en Ingeniería Biomédica* por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Actualmente se desempeña como profesor del departamento de Ciencias e Ingenierías en la Universidad Iberoamericana Puebla y realiza investigación biomédica en el Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica. Ha publicado artículos científicos y de difusión de la tecnología.

Email: juancarlos.colin@iberopuebla.mx  
Twitter: @jccolino "Dr. Ing. Colin"

### Mtro. Huber Girón (UIAP, México)

Es Ingeniero Electrónico, Ingeniero Mecatrónico y Maestro en Ciencias Computacionales. Adicionalmente cuenta con la especialidad en electricidad y electrónica automotriz, mecánica automotriz, y la maestría en innovación y desarrollo tecnológico. Ha participado en la planeación de sistemas eléctrico/electrónicos enfocados al Proyecto Golf A7, Proceso de hojalatería; Encargado de elaborar especificaciones técnicas eléctricas, activación, liberación y seguimiento de documentos, control y supervisión de campo, seguimiento y entrega de proyectos, apoyo en las pruebas y puesta en marcha de las instalaciones eléctricas/electrónicas según las normas y estándares de VWM y en otros proyectos como Banco de pruebas de vibraciones, Banco de pruebas de impacto automotriz, Pruebas de impacto automotriz, Equipo de compactación de basura (Packer) de carga trasera, dimensiones y peso disminuido para exportación en kids de subensamble, Desarrollo de Equipo de Mezclado de concreto para instalaciones mineras y túneles, Desarrollo de dos nuevos productos con aporte nutricional para el aprovechamiento integral del coco en el Estado de Guerrero, Sistema Integral de pruebas a manijas, switch, cilindros y llaves automotrices cumpliendo con nuevos estándares internacionales y Mejora de prototipo y proceso de fabricación de bomba de concreto estacionaria de altas prestaciones y rentabilidad. Coordinación del área de investigación Mecatrónica, planeación y seguimiento de proyectos y prototipos afines al área. Diseño electrónico, mecánico y desarrollo de software. Desarrollo de proyectos de CONACYT, INADEM, fondos de investigación, necesidades internas de la universidad y asesoría de proyectos de alumnos. Coordinación de alumnos de Servicio Social, Prácticas profesionales y Servicio Becario que participan en los proyectos. Obtuvo el Premio al Desempeño de excelencia CENEVAL Ing. Electrónica, el Premio al Desempeño Sobresaliente CENEVAL Ing. Mecatrónica, Mención Honorífica por Excelencia Académica, Mejor Promedio de egresado Ing. Electrónica generación 2013, Mejor Promedio de egresado Ing. Mecatrónica generación 2015, Becario Roberto Rocca Education Program y Mención Honorífica por Excelencia.

Email: huber.giron2@iberopuebla.mx

### Mtro. Carlos Miguel Merino Arroyo (Unidad de Quemados – HNP)

Egresado de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el año 1999, egresado de la Maestría en Ingeniería Biomédica de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla en el año 2007, con más de 10 años de experiencia trabajando en Hospitales y empresas relacionadas, siempre desarrollándose como Ingeniero Biomédico sobre todo en el área de Mantenimiento; con experiencia también asistiendo en cirugías supervisando el equipo médico del quirófano y experiencia en Unidad de Cuidados Intensivos con equipos de soporte de vida.

Desde 2008 laborando en la Unidad de Quemados (Anexa al Hospital para el Niño Poblano) de los Servicios de Salud del Estado de Puebla, como Ingeniero Biomédico.

Más de 10 años de experiencia en la docencia impartiendo diferentes materias de las carreras de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Biomédica en la Universidad Iberoamericana y en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Actualmente impartiendo el Módulo "Administración de Infraestructura Hospitalaria" de la Maestría en Ingeniería Clínica de la Universidad Modelo de Mérida Yucatán.

# Radiative Warming Capability Characterization of an Infrared Emitter for Biomedical Purposes

J. C. Colin-Ortega<sup>1,a</sup>, J. P. Miselem<sup>2,b</sup>, R. J. Alcazar-Olan<sup>3,c</sup>, C. M. Merino-Arroyo<sup>4,d</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica, Ibero Puebla

<sup>2</sup> Universidad Iberoamericana Puebla, Depto. de Ciencias e Ingenierías

<sup>3</sup> Universidad Iberoamericana Puebla, Depto. de Ciencias de la Salud

<sup>4</sup> Unidad de Quemados anexa a Hospital para el Niño Poblano

<sup>a</sup> juancarlos.colin@iberopuebla.mx, <sup>b</sup> jpmiselem@hotmail.com, <sup>c</sup> raul.alcazar@iberopuebla.mx, <sup>d</sup> carlos.merino@iberopuebla.mx

**Abstract**—Inadvertent perioperative hypothermia is nowadays a serious problem in surgical environments. Several methods exist to help maintaining patient body temperature such as passive insulation, electric resistive, forced air and water circulation. This work begins to explore the infrared emission from semiconductors for these purposes. Methods. The radiation from a commercial infrared LED used in telecommunications, was applied to a temperature sensor at different distances from 0 to 7 mm and intervals of 0.5 mm. The mass of the sensor encapsulated was considered as the mass to warm. Current intensity was constant during all measuring process. Radiation duration was 200 s for each distance. Temperature traces were processed manually to model the warming effect versus distance, considering the target mass to be heated and the radiation aperture pattern of the emitter. Results. Traces from oscilloscope show clearly a capability of remote heating from the IR emitter. Temperature raising diminish with distance between emitter and sensor, in an exponential way. A brief test shows that the accumulation of two emitters irradiating over one sensor, cause the superposition of the heating effect. Among the minimum possible distance from a surgical patient, and data related to the weight of skin, a quantity of emitters for a hypothetical warming lamp was estimated. Conclusions. Due to the estimated number of emitters needed, in spite of the power consumed, this technology is viable to be included in a surgical remote warming system to diminish the heat transfer from patient core body to the environment.

**Keywords:** Surgical warmer, patient warming, infrared warming.

**Resumen**—La hipotermia perioperatoria inadvertida es hoy en día un problema grave en los entornos quirúrgicos. Existen varios métodos para ayudar a mantener la temperatura corporal del paciente, como la insolación pasiva, la resistencia eléctrica, el aire forzado y la circulación de agua. Este trabajo comienza a explorar el uso de la emisión infrarroja de los semiconductores para estos fines. Metodología. La radiación de un LED infrarrojo comercial utilizado en telecomunicaciones se aplicó a un sensor de temperatura a diferentes distancias de 0 a 7 mm en intervalos de 0,5 mm. La masa del sensor encapsulado se consideró como la masa a calentar. La intensidad de corriente fue constante durante todo el proceso de medición. La duración de la radiación fue de 200 s para cada distancia. Los resultados de temperatura se procesaron manualmente para modelar el efecto de calentamiento frente a la distancia, considerando la masa objetivo que se calentará y el patrón de apertura de radiación del emisor. Resultados Las muestras en el osciloscopio muestran claramente una capacidad de calentamiento remoto desde el emisor infrarrojo. La elevación de temperatura disminuye con la distancia entre el emisor y el sensor, de manera exponencial. Una breve prueba muestra que la acumulación de dos emisores que irradian sobre un sensor, causa la superposición del efecto de calentamiento. Entre la distancia mínima posible de un paciente quirúrgico y los datos relacionados

con el peso de la piel, se estimó una cantidad de emisores para una lámpara de calentamiento hipotética. Conclusiones. Debido a la cantidad estimada de emisores necesarios, a pesar de la potencia consumida, esta tecnología es viable para incluirla en un sistema de calentamiento remoto quirúrgico para disminuir la transferencia de calor del cuerpo del paciente al medio ambiente.

**Palabras clave:** Calentamiento quirúrgico, calentamiento de paciente, calentamiento infrarrojo.

## 1. Introduction

Human body presents naturally a thermoregulatory system. Hyperthermia leads to vasodilatation, blushing and sweat, while hypothermia leads to vasoconstriction and shivering. These reactions cause a gradual recuperation of the temperature homeostasis and the maintaining of normothermia (1). Anaesthesia impairs the thermoregulatory system. According to studies, hypothermia in patients about to be intervened has a prevalence of more than 50% (2). Strategies to avoid or diminish inadvertent hypothermia can be divided into two categories: active and passive methods (3). Passive methods include blankets, metalized foils and draping. Active methods include forced air devices, electric resistive blankets and water circulating mattresses (4). According to Moola (5), the most effective way to warm a patient between several active and passive options including radiant devices, is forced air warming (6). The typical radiant device for the mentioned purpose is an infrared incandescent lamp. Such lamp reaches a high temperature in the source of radiation, which is undesirable due to the warming of the nearby area. An infrared light emitter diode is a semiconductor designed to produce light of a specific wavelength. This light, when in the infrared spectrum band, is capable to warm a target mass.

The concept under exploration is to warm the most external layer of skin, in order to diminish the heat transfer from the core of the patient (7). It is considered that a large quantity of IR-LEDs is required for this task.

### A. Objective

To characterize the warming capability of the IR333 infrared emitter due to explore the usage of optical semiconductors for biomedical temperature control purposes.

## 2. Methods and results

Radiant power of emitters is known from manufacturer datasheets. Even though, the objective is to measure the induction of heat generated by infrared radiation, which is important for the purposes of this work. There is a correlation between irradiation power, distance from and the mass of the target object.

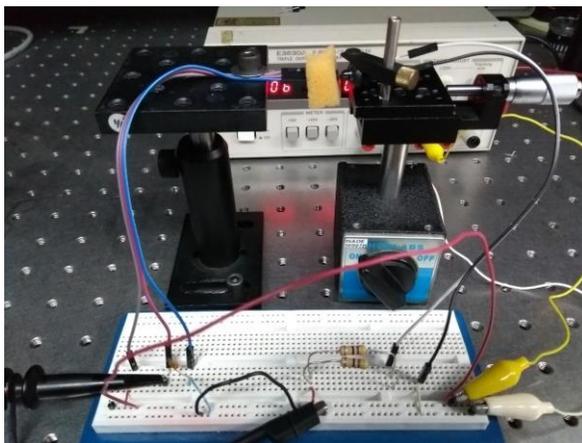


Fig 1. Photo of the experimental array and the electrical circuit used

Of course, other environment factors and characteristics of the target object do influence on the warming capability, but these are not in the focus of this work.

A typical commercial infrared LED for telecommunications and remote controls was selected. It is the IR333 with a radiant power of 85 mW/sr (8), a maximum current of 100 mA, and maximum forward voltage of 1.4 V. For these range of power, the experiment was performed in a mili-scale. Distance was adjusted from 0 to 7 mm from emitter to target. The aperture angle of the beam according to datasheet is 20 degrees. When distance grows, part of radiation is wasted due to an excessive aperture of beam, which is an additional reason for not going beyond 7 mm of distance. Distance was adjusted in 0.5 mm increments for each measure, using a precision screw holder as shown in figure 1.

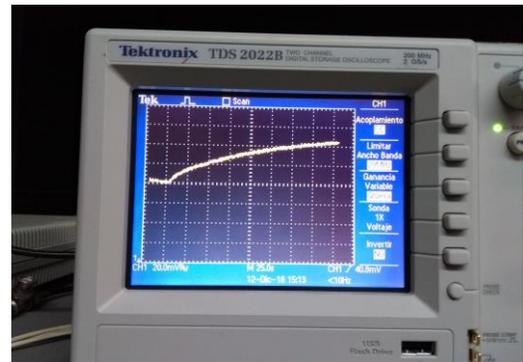


Fig 2. Sample of trace obtained from oscilloscope Tektronix TDS 2022B's screen

To sense the temperature, a LM35 well known integrated circuit was used with a polystyrene foam side cover to diminish the heat dissipation from the sensor package. This IC brings 10 mV per degree Celsius. A Tektronix TDS 2022B oscilloscope was destined to display the output signal from the sensor. For this low power experiment, a tiny target mass was needed. It was decided to use the temperature sensor package of 0.1897 g as the target mass. The power for the temperature sensor IC must be in the 4 to 20 V range. A voltage of 5 V and an adequate resistor of 25 Ohm was used in order of have a continuous current of 100 mA through the IR-LED, in an array shown in figure 1.

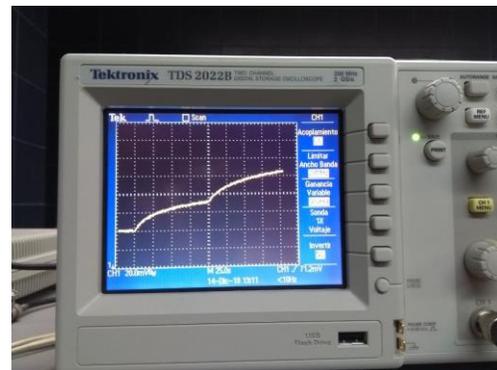


Fig 3. Trace of sensor voltage output, showing the superposition of effects with two emitters irradiating at once.

The sensor was irradiated for 200s as the oscilloscope was registering the voltage fluctuation. Between each of these recordings, a cooling procedure (fresh air blowing) was executed. Each of these 14 traces (from 0 to 7 mm, with distance increments of 0.5 mm) was photographed. A sample of these photographs is shown in figure 2. From the photos, a dataset of temperature increments was manually obtained for exposure times in increments of 10 s this means 20 datasets including an obvious set of zero temperature increments for time zero. The photographed traces showed a notorious noise

which led the person who took the data to estimate the center of the value in the observation time point in traces.

An exponential regression of all the obtained curves was analyzed to obtain the expression relating distance, temperature and time for the tiny mass used in the experiment, shown in formula 1. In order to infer that the accumulation of emitter could have a linear reaction, a simple test was performed in this way: Two emitters were aimed to a unique sensor, from directions separated 60 degrees between them. Irradiation was tested first with one emitter on at a time, and with the two emitters on at once.

$$y = 51.849x^{-0.271} \tag{1}$$

The obtained trace is shown in figure 3, revealing a clear superposition effect due to the effect of temperature increment with the two emitters at once, being equivalent to the effect of just one emitter, plus the effect of the other.

### A. Results

The curve obtained through data extraction from oscilloscope traces shown in figure 4, describes the effect of infrared irradiation in the target mass temperature, depending on distance and exposure time. The capability of warming the target mass, diminishes with distance and increases with the exposure time. From this data, a second order regression was performed to obtain an analytic model of the increment on temperature through different distances.

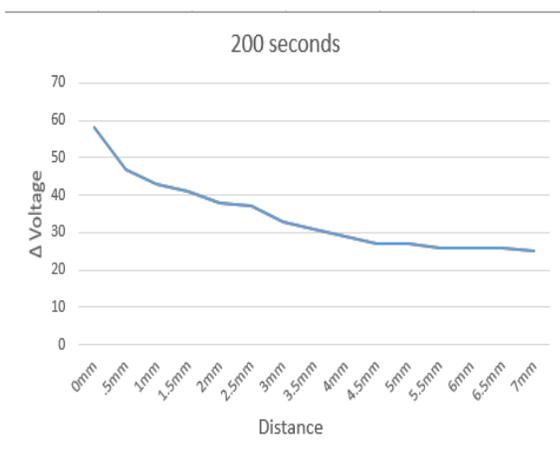


Fig 4. Effects of infrared irradiation depending on distance and exposure time for a mass of 0.1897 g.

The graphic obtained with this equation (figure 5) shows the extrapolation of the effect of infrared irradiation at distances quite longer, this is, distances of near 800 mm, expected in operative rooms from instruments and lamps hanged over the operative table, to the patient body. The area of body skin to be heated in a patient can be considered 400 squared cm, which represents the 2.21% of total body surface. The average skin weight in a human body is 3,393 g (9). The concept under this purpose is to warm the skin and slow the transfer of heat from the body's core to the skin. Thus, the mass of skin to heat is 75 g.

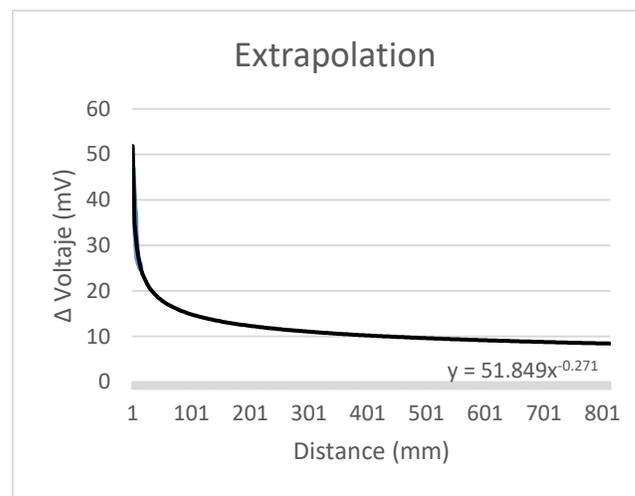


Fig 5. Extrapolating model for the temperature increment effect of infrared irradiation.

Only for estimating purposes, it was considered that an alarming temperature of skin is 34° Celsius. Two degrees Celsius as a temperature increment goal is set. With these values, a quantity of 933 infrared LEDs for a future warming lamp is required.

### 3. Conclusions

Almost one thousand LEDs required may seem an excessive quantity, but the experiments for this work were performed over a low power communications LED. Consider that the use of a power LED with 10 times the radiant power of the IR333, the required quantity of LEDs will be near to one hundred. One hundred power LEDs will demand an important intensity of electric current. The management of this current will be an issue of other work. Due to the estimated number of emitters needed, despite of the power consumed, this technology is viable to be included in a surgical remote warming system to diminish the heat transfer from patient core body to the environment.

## 4. Bibliography

- [1] **Sessier, D. I.** *Temperature Monitoring and perioperative thermoregulation.* Anesthesiology, 318-338 (2008).
- [2] **Bandic, D., Sakan, S., Balenovic, I., Martinovic, Z., Baronica, R., Tonkovio, D. and Perio, M.** *Inadvertent hypothermia during the perioperative period.* Signa Vitae, 41-43 (2015).
- [3] **Care, National Collaborating Centre for Nursing and Supportive.** *The management of inadvertent perioperative hypothermia in adults.* Londres : Royal College of Nursing, (2008).
- [4] **Madrid E., Urrutía G., Roqué i Figuls M., Pardo-Hernandez H., Campos J. M., Paniagua P. and Maestre L.** *Active body surface warming systems for preventing complications caused by inadvertent perioperative hypothermia in adults (review).* Barcelona : Wiley, (2016).
- [5] **Moola, S. and Lockwood, C.** *Effectiveness of strategies for the management and/or prevention of hypothermia within the adult perioperative environment.* s.l. : Int J Evid Based Healthcare, 9(4):337-45 (2011).
- [6] **Y. Matsuzaki, T. Matsukawa, K. Ohki, Y. Yamamoto, M. Nakamura and T. Oshicuchi.** *Warming by resistive heating maintains perioperative normothermia as well as forced air heating.* British Journal of Anaesthesia, 689-691 (2003).
- [7] **Corallo, J. P., King, B., Pizano, L. R., Namias, N. and Schulman, C. I.** *Core warming of a burn patient during excision to prevent hypothermia.* Elsevier, 1-3 (2007).
- [8] **Electronics, TT.** *Converting Radiant Intensity in Units of mW/cm2 to mW/sr.* Carrollton, Texas, USA : s.n., 02-25 (2019).
- [9] **Leider, M.** *On the weight of the skin.. Journal of the American Medical Association - Correspondence -, (1947).*

## 5. Biografías

### Dr. Juan Carlos Colin-Ortega (UIAP, México)

Originario de la ciudad de Querétaro, su trayectoria es de 15 años en la industria y 16 años como académico. En la industria ha optimizado procesos utilizando como herramienta a las tecnologías de información y comunicaciones y dirigiendo unidades de negocio con orientación al cliente en empresas como Procter & Gamble, Condumex e Industrial Minera México. En la academia tiene experiencia en la gestión de servicios, así como en la docencia y la investigación en el área de la Ingeniería Cibernética.

Está diplomado en *Innovación para el aprendizaje, Mejoramiento de la Calidad en el Aprendizaje de la Ingeniería, Ingeniería Cardiovascular, Modelos Matemáticos y Computacionales.* Está certificado como *Technology Specialist* por Microsoft Corporation y como *Evaluador* por el Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería CACEI.

Tiene los grados de *Ingeniería Electrónica y de Comunicaciones* por la Universidad Iberoamericana Ciudad de México, *Maestría en Ingeniería de Calidad* por la Universidad Iberoamericana Puebla, y *Doctorado en Ingeniería Biomédica* por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Actualmente se desempeña como profesor del departamento de Ciencias e Ingenierías en la Universidad Iberoamericana Puebla y realiza investigación

biomédica en el Instituto de Diseño e Innovación Tecnológica. Ha publicado artículos científicos y de difusión de la tecnología.

Email: [juancarlos.colin@iberopuebla.mx](mailto:juancarlos.colin@iberopuebla.mx)  
Twitter: @jccolino “Dr. Ing. Colin”

### Juan Pablo Miselem Martínez del Río (UIAP, México)

Originario de Cancún, Quintana Roo. Es actualmente estudiante del programa de Ingeniería Biomédica en la Universidad Iberoamericana Puebla. Participa como becario en los proyectos “Exoesqueleto industrial de tronco superior” y “Prótesis y Ortesis 3D”.

### Dr. Raúl José Alcázar-Olán (UIAP, México)

Estudió Maestría y Doctorado en Psicología en la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente es profesor de tiempo completo en la Universidad Iberoamericana Puebla, y dirige trabajos de investigación de alumnos de la licenciatura en psicología.

Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel 1.

Ha sido invitado como revisor para el arbitraje de artículos en las revistas Youth and Society, The Spanish Journal of Psychology, Journal of Child & Adolescent Substance Abuse y la Revista Mexicana de Psicología.

Ha participado como evaluador de proyectos de investigación para la Universidad Autónoma de Colima, la Universidad Autónoma de Aguascalientes y la Universidad Nacional Autónoma de México.

También ha evaluado trabajos que solicitan becas de tesis por medio del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Puebla (a nivel estatal) y ha evaluado proyectos de investigación en el programa de Fondos Sectoriales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Su línea de investigación de 2008 a la fecha es la evaluación y tratamiento del enojo problemático.

Email: [raul.alcazar@iberopuebla.mx](mailto:raul.alcazar@iberopuebla.mx)

### Mtro. Carlos Miguel Merino Arroyo (Unidad de Quemados – HNP)

Egresado de la Facultad de Ciencias de la Electrónica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el año 1999, egresado de la Maestría en Ingeniería Biomédica de la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla en el año 2007, con más de 10 años de experiencia trabajando en Hospitales y empresas relacionadas, siempre desarrollándose como Ingeniero Biomédico sobre todo en el área de Mantenimiento; con experiencia también asistiendo en cirugías supervisando el equipo médico del quirófano y experiencia en Unidad de Cuidados Intensivos con equipos de soporte de vida.

Desde 2008 laborando en la Unidad de Quemados (Anexa al Hospital para el Niño Poblano) de los Servicios de Salud del Estado de Puebla, como Ingeniero Biomédico.

Más de 10 años de experiencia en la docencia impartiendo diferentes materias de las carreras de Ingeniería Mecatrónica, Electrónica y Biomédica en la Universidad Iberoamericana y en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla.

Actualmente impartiendo el Módulo “Administración de Infraestructura Hospitalaria” de la Maestría en Ingeniería Clínica de la Universidad Modelo de Mérida Yucatán.

# Algoritmo de control para la detección de colisión de una pinza robótica.

A. Izaguirre<sup>1,a</sup>, C. Navarro<sup>1,b</sup>, N. Rodríguez<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> CIATEQ A.C. Maestría en Sistemas Inteligentes Multimedia

<sup>2</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Dpto. de Energía

<sup>a</sup> izaguirreaaron@gmail.com, <sup>b</sup> cang24@yahoo.com.mx, <sup>c</sup> noeamir@gmail.com

**Resumen**—La interacción entre personas y autómatas programables va en incremento conforme surgen nuevas tecnologías, cuando la aplicación requiere materiales y componentes específicos como lo es la industria alimentaria, las soluciones se vuelven mas costosas y complejas, en el presente trabajo se desarrolla un algoritmo de detección de colisión de una pinza robótica; utilizando sensores de fuerza en puntos específicos de la pinza en combinación con un algoritmo basado en redes neuronales artificiales se logra detectar una colisión, si la pinza toma un objeto correctamente o si se encuentra libre. El algoritmo propuesto ha sido probado bajo condiciones controladas y se ha comprobado su funcionalidad.

*Palabras clave.* Colisión, manipuladores, detección, alimentos.

## 1. Introducción

Existen aplicaciones en las que las máquinas y las personas trabajan en conjunto para realizar una tarea, los robots colaborativos (cobots o co-robots) [1] han sido implementados para muchos de estos casos en los que una tarea repetitiva y la interacción de una persona se unen en un proceso de producción. La seguridad en esta interacción es un factor de gran importancia para el usuario y para la máquina como tal, donde lo ideal es evitar daños a las dos partes sin interrumpir el proceso o detenerlo el menor tiempo posible; en aplicaciones específicas como lo es la industria alimentaria, el uso de ciertos materiales y componentes debe cumplir con normas de seguridad para estar en contacto con alimentos [2]. En el presente documento se desarrolla un algoritmo de control eligiendo como método de detección de colisión sensores de fuerza como entrada del sistema y redes neuronales artificiales para el procesamiento de datos para detectar la colisión inmediata de una pinza robótica mientras se encuentra en movimiento dentro de su ambiente de trabajo.

## 2. Parte técnica del artículo

Al realizar un análisis de esfuerzos por software se detectaron las principales zonas en las que la pinza recibe la mayor carga durante una colisión, el sensor de fuerza es colocado en esta área para probar y definir los valores de la señal analógica que serán procesados por el ADC para luego ingresarlos a la red neuronal. Para la prueba preliminar se hace uso del microcontrolador MSP430F5529 de Texas Instruments para la recepción, procesamiento y envío de señales; por medio

del convertidor analógico-digital se toman los valores de voltaje de entrada del sensor y se define el estado de dos variables definidas A y B como se muestra en la Tabla I.

TABLA I. PONDERACIONES DE ENTRADA Y ASIGNACIÓN DE VALORES DE ENTRADA DE LA RNA.

Entrada	A	B
$V_{in} < 1.1 \text{ V}$	0	0
$1.1 \text{ V} < V_{in} < 2.5 \text{ V}$	0	1
$1.1 \text{ V} < V_{in} < 2.5 \text{ V}$	1	0
$V_{in} > 2.5 \text{ V}$	1	1

Después de definir los valores de A y B para cada caso, estos serán ingresados en la capa de entradas de entrenamiento de la red neuronal, la salida Y está definida con los valores de la función XOR como salidas de entrenamiento de la red neuronal. La Tabla II muestra los valores de la capa de entradas (A,B) y la capa de salida (Y).

TABLA II. TABLA DE VERDAD DE LA FUNCIÓN XOR

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Cuando el valor de Y es igual a 1 la pinza se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento, pues el valor de la entrada analógica está en el rango establecido y escribe 0 y 1 en las variables A y B respectivamente, lo cual indica que la pinza ha tomado el objeto correctamente. Si el valor de entrada está por debajo del establecido, en las variables A y B se escribirá 0 y se obtiene un 0 en la salida Y, lo que significa que la pinza perdió el objeto durante la operación. Para valores por encima del establecido se escribe 1 en las variables A y B obteniendo 0 en la salida Y, esto indica colisión durante la operación.

La red neuronal propuesta consta de dos entradas denominadas A y B, cuatro neuronas en la capa oculta y una salida Y como se muestra en la Fig. 1.

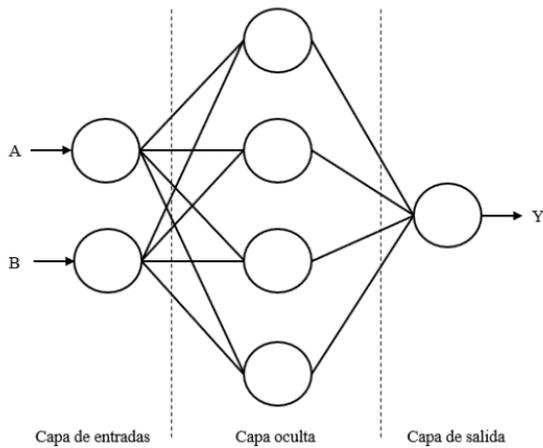


Fig. 1. Distribución de la red neuronal propuesta.

Para la función de activación se eligió la función sigmoide (1) debido a los valores de salida que esta función puede tomar, que van de 0 a 1 para así activar o desactivar la neurona [3].

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (1)$$

La salida de la red se dispone de forma binaria (0 o 1) dependiendo del valor obtenido por la función de activación, el cual será ejecutado en un momento específico del ciclo de operación del sistema. Se inyectaron los voltajes definidos en la entrada analógica del microcontrolador para comprobar la función de la red neuronal después de terminar la etapa de entrenamiento y se obtuvieron los siguientes resultados: para una entrada de 0 V las variables A Y B toman los valores de la Fig. 2.

(x)= Variables	Expressions	Registers		
Expression	Type	Value	Address	
(x)= A	unsigned int	0	0x002402	
(x)= B	unsigned int	0	0x002404	

Fig. 2. Valores de A y B para una entrada de 0 V.

Para una entrada de 2 V las variables A y B toman los valores mostrados en la Fig. 3.

(x)= Variables	Expressions	Registers		
Expression	Type	Value	Address	
(x)= A	unsigned int	0	0x002402	
(x)= B	unsigned int	1	0x002404	

Fig. 3. Valores de A y B para una entrada de 2 V.

Para una entrada de 3.3 V las variables A y B toman los valores mostrados en la Fig. 4.

(x)= Variables	Expressions	Registers		
Expression	Type	Value	Address	
(x)= A	unsigned int	1	0x002402	
(x)= B	unsigned int	1	0x002404	

Fig. 4. Valores de A y B para una entrada de 3.3 V.

Estos valores son ingresados en el programa para ser utilizados como entradas de entrenamiento de la red y se definen las salidas de la función XOR para lograr el comportamiento deseado para la aplicación (ver Fig. 5).

```
float X1[5][E]={0,0},{1,0},{0,1},{1,1}}; // entradas para entrenamiento
float Y1[5][0]={0},{1},{1},{0}}; //salidas para entrenamiento
```

Fig. 5. Valores de entradas y salida de la red neuronal.

De esta forma el algoritmo logra procesar los datos de entrada provenientes del sensor, convertirlos en estados binarios almacenados en las variables A y B para luego utilizarlos como entradas de entrenamiento de la red, la salida muestra un dato binario que se utilizará para alertar si la pinza está funcionando correctamente o tuvo una colisión y se debe detener su movimiento inmediatamente.

### 3. Conclusiones

Este algoritmo permite detectar la colisión de manipuladores robóticos donde las restricciones de espacio, uso de materiales específicos y presupuesto sean un factor importante; es necesario un previo análisis de esfuerzos al manipulador o pinza robótica para lograr la correcta ubicación de los sensores, logrando así una instrumentación discreta y adecuada a la aplicación, utilizando un número reducido de componentes para la obtención y procesamiento de señales manteniendo la versatilidad y robustez que ofrecen este tipo de algoritmos basados en RNA.

### 4. Referencias

- [1] Jung, B. Choon Koo, K. Ryeol Choi, H. "Enhanced Collision Detection Method Using Frequency Boundary of Dynamic Model". IEEE ISR. 2013.
- [2] NSF/ANSI 2 – 2018, Food Equipment, NSF International Standard / American National Standard.
- [3] J. R. Hilerá; V. J. Martínez; "Redes neuronales artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones". Ed. Rama, 1995.
- [4] Park, D. Erickson, Z. Bahattacharjee, T. "Multimodal Execution Monitoring for Anomaly Detection During Robot Manipulation". IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2016.

- [5] Fennuci, A. Indri, M. Romanelli, F. "A Real Time Distributed Approach to Collision Avoidance for Industrial Manipulators". Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation, 2014.
- [6] Indri, M. Trapani, S. Lazzero, I. "Development of a Virtual Collision Sensor for Industrial Robots". MDPI, 2017.
- [7] Indri, M. Trapani, S. Lazzero, A. "General Procedure for Collision Detection Between an Industrial Robot and the Environment". IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, 2015.

## 5. Biografías

Aarón Izaguirre Solís. Ingeniero en Electrónica con especialidad en Automatización y Control, egresado del Tecnológico Nacional de México campus San Luis Potosí en 2015. Ha trabajado principalmente en el área de innovación y desarrollo para la industria alimentaria. Su área de interés es el desarrollo de sistemas embebidos y automatización de procesos.

César Augusto Navarro Gómez. Ingeniero en Sistemas Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Pachuca en 2003. Ha ejercido principalmente en el área de sistemas de misión crítica del sector bancario y telecomunicaciones. Su área de interés es visión por computadora e inteligencia artificial.

Noé Amir Rodríguez Olivares. Ingeniero Mecatrónico egresado del Instituto Tecnológico de Poza Rica en 2012. Obtuvo el grado de Maestría en Mecatrónica en 2014 y actualmente estudia el Doctorado en Mecatrónica en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial de la ciudad de Querétaro, Querétaro, México. Su área de interés son los sistemas de almacenamiento de información.

# Evaluación de corte fino de chapa metálica de acero AISI 1023 utilizando método de elemento finito

F.A. Villa<sup>1,a</sup>, N.A. Rángel<sup>2,b</sup>, C. I. Rodríguez<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Depto. De Mecatrónica

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico Nacional, Depto. de Ingeniería Mecánica

<sup>a</sup> villa@utags.edu.mx, <sup>b</sup> geometry198128@gmail.com, <sup>c</sup> crodriguez@utags.edu.mx

**Resumen**— En esta investigación se realizó el estudio y evaluación de un troquel mecánico con la característica de corte fino para el corte de placas metálicas con el objetivo de evaluar la vida útil del producto a través del análisis de elementos finitos (FEA), utilizando como herramienta de diseño y análisis la plataforma CATIA V5, que permitieron generar un modelo virtual con la caracterización de la deformación en los perímetros de corte y los ángulos de desgarre, utilizando el acero como material de prueba.

*Palabras clave.* Corte fino, Troquel, Elemento finito.

## 1. Introducción

La definición de corte de borde fino, comúnmente conocido como corte fino, es muy imprecisa pero la descripción más aceptada es la de organización Internacional Fine-Blanking: Corte Fino, es un proceso híbrido de formado de metal combinando las tecnologías de estampado y extrusión en frío. Esto produce una parte con una excepcional calidad de borde, superior planicidad, secciones de paredes delgadas y espaciamiento lineal se mantendrá dentro de 0.001”.

La calidad y el costo son criterios críticos cuando es seleccionado un método de manufactura. Como un costo efectivo de la tecnología de manufactura, el método de corte fino se ha convertido en una necesidad en muchos de los principales sectores industriales, en sustitución a opciones de manufactura más caras. [1]

El análisis estático de un prototipo por medio de FEA permite valorar un efecto físico muy parecido a una prueba de ensayo de tensión para conocer la resistencia que presentan las piezas cuando son sometidas a cargas externas, el uso del método por elemento finito es identificado como útil herramienta de análisis [2]. En este trabajo el análisis del fallo y la introducción de mejoras en el producto fueron realizados mediante un modelo por elementos finitos con la plataforma CATIA V5 para evaluar los esfuerzos y establecer el corte en una geometría circular para evaluar el desgarre de la lámina de acero AISI 1023 a cortar.

## 2. Parte técnica del artículo

Los procesos de corte fino se establecen del criterio de desgarramiento en el material entre las zonas de corte, en la figura 1, se muestra las características de un troquel convencional y un troquel de corte fino, describiendo las partes que le componen. Para producir piezas por troquelado fino, se requiere de un troquel preciso con un punzón inferior y una holgura de matriz (1/2 del espesor del material) se requiere junto con esto una prensa de triple acción para sujetar el material durante la operación de corte. Las tres acciones en la prensa proveen la presión de cizallamiento, la presión del anillo-V, y la contrapresión. Estos deben mantenerse constantes en todo el desplazamiento para asegurar piezas de buena calidad.

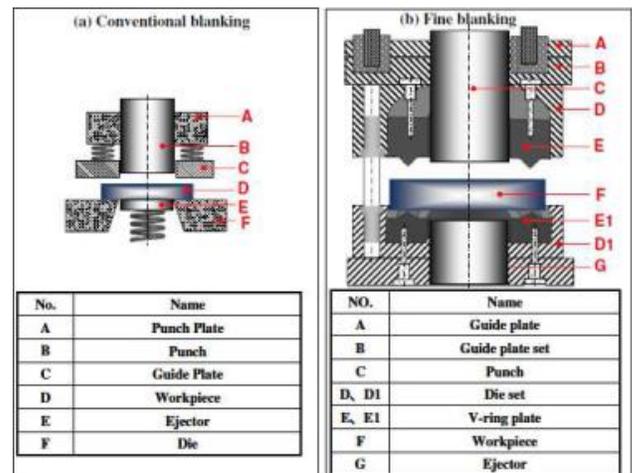


Fig. 1 Configuración esquemática de corte fino y corte convencional [2]

La figura 2 muestra los colores asignados a un troquel (naranja) y la característica de desgarre en el material (rojo), así como los dados que forman la sujeción entre el material a cortar y el material sobrante (amarillo).

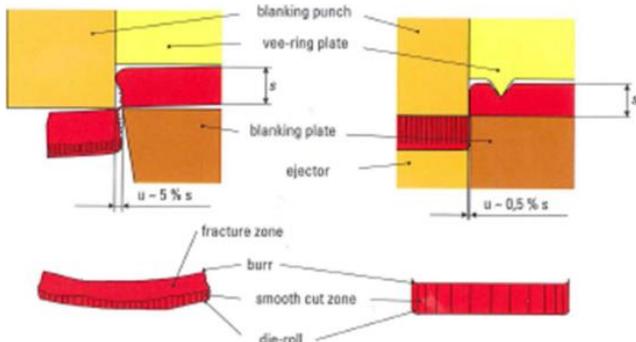


Fig. 2 - Diferencia de resultados entre el corte fino y corte convencional [16]

En donde para generar el corte es necesario el uso de la prensa de corte fino, la cual no es una prensa estándar de estampado. Las prensas de corte fino son únicas por proveer tres movimientos específicos:

- Un movimiento de agujijón, la cual trae la placa de agujijón (Vee ring) hacia arriba y mantiene el material en su lugar durante el corte.
- Un movimiento de corte, la cual proporciona la fuerza de supresión para empujar la pieza en la cavidad de la matriz para obtener la pieza cortada.
- Un movimiento de contrapresión, el cual mantiene la pieza contra el punzón durante el corte y expulsa la parte de la pieza de la cavidad de la matriz después de haberse completado el corte. [5]

En la figura 3, se observa que en un corte convencional se aprecian los desgarros existentes en los costados del corte, mientras que en el corte fino se eliminan del desgarro del material.

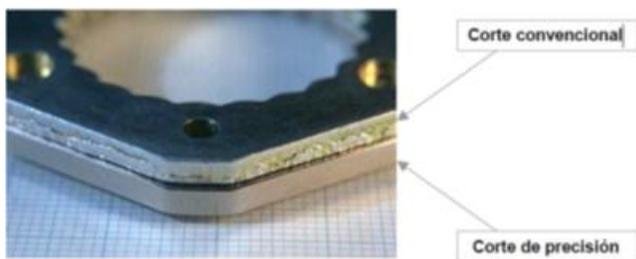


Fig. 3 - Muestra de las superficies de corte convencional y corte fino o de precisión [3]

El proceso de corte fino requiere una secuencia controlada de movimientos con un preciso punto muerto superior. La estricta holgura de corte de la matriz podría no cambiar incluso bajo niveles altos de esfuerzo. Las prensas de corte fino por lo tanto deben cumplir con estrictos requerimientos de precisión, incluyendo cuñas deslizantes, marcos altamente rígidos y paralelismo entre las superficies de sujeción del troquel como se muestra en la tabla 1. [1]

Tabla 1 - Principales características obtenidas en un corte fino y un corte convencional [3]

CORTE FINO	CORTE CONVENCIONAL
Piezas con gran planitud.	Piezas carentes de total planitud.
Gran perpendicularidad entre la cara de corte y la superficie.	Falta de perpendicularidad.
Bajo grado de rugosidad en la superficie de corte.	No hay control de rugosidad en la superficie de corte.
No hay presencia de desgarro en la cara de corte.	Desgarro en 2/3 partes del espesor.
Se obtiene medidas con precisión centesimal.	Se obtiene medidas con precisión decimal.
La banda circula por la parte superior de matriz.	La banda circula por la parte inferior de la matriz.
La expulsión de la pieza y del retal se realiza conjuntamente mediante cañones de aire.	La expulsión de la pieza y del retal se realiza en forma separada.
La tolerancia de corte está en torno al 1 % del espesor del material.	La tolerancia de corte está entre el 7% y el 10% del espesor del material.

La figura 4, se muestra la deformación en el proceso de corte, así como las direcciones del troquel al momento de realizar el corte, se aprecia la deformación en el material y la característica que impide que exista desgarro en el proceso de corte. Para que sea posible el desgarro en el material, es necesario que la fuerza que debe ejercer el punzón sobre la chapa para poder perforarla o cortarla.

El esfuerzo de corte es un proceso que tiene lugar cuando el punzón, en el momento de contactar con el material, inicia su acción de compresión seguida de una reacción o resistencia equivalente por parte del material [3]. En ese momento el punzón debe vencer la resistencia que le ofrece el material y seguir su proceso de descenso hasta sobrepasarlo y cortarlo en su totalidad.

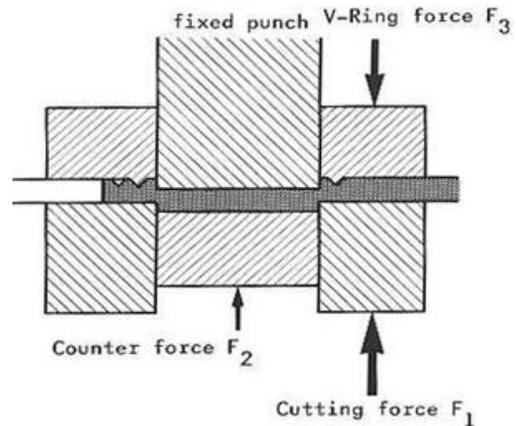


Fig. 4 - Fuerzas en matriz de Punzón fijo [2]

El esfuerzo de corte viene determinado de la siguiente forma:

$$F_s = p * s * R_m * f_1 \quad \text{Unidad}$$

$F_s$	Fuerza de corte	163,816.78	N
$p$	Perímetro de pieza	157.08	mm
$s$	Espesor del material	1.8	mm
$R_m$	Resistencia de tracción	673.7	MPa
$f_1$	0.6 a 0.85	0.86	

La tabla 2 muestra la relación de corte en una lámina de calibre 16 (1.8 mm) entre el esfuerzo aplicado para el corte y el espesor de corte de en la lámina.

Tabla 2 - Deformación de chapa

CHAPA 1.8 mm	
Espesor de material mm	Fuerza de corte en N
1.8	163,816.784
1.7	154,715.852
1.6	145,614.919
1.5	136,513.987
1.4	127,413.054
1.3	118,312.122
1.2	109,211.189
1.1	100,110.257
1.0	91,009.325
0.9	81,908.392
0.8	72,807.460
0.7	63,706.527
0.6	54,605.595
0.5	45,504.662
0.4	36,403.730
0.3	27,302.797
0.2	18,201.865
0.1	9,100.932
0	0.000

El software que se utilizará para hacer el modelo en 3D de la chapa metálica, así como los cálculos por elementos finitos (FEA) será el CATIA V5, la ventaja de este programa que pueden calcular mallas complejas para evaluar los puntos de fractura en el modelo, así como es posible que las piezas o partes del sistema puedan tener el mejor acomodo y obtener el mayor aprovechamiento de la lámina.

La secuencia para diseñar la chapa metálica es:

- Generar el modelo conceptual.
- Crear el diseño en 3D.
- Obtiene el diseño 2D en desarrollo.
- Ejecuta el maquinado y dobles.
- Producción.

Con el uso del software para el diseño de chapa metálica favorecerá la planificación, así como reducirá el número de pruebas en herramientas y la fabricación posterior del prototipo.

La tabla 3 muestra los diversos tipos de calibres de láminas:

Tabla de Calibres para Lámina			
Calibre	Pulgadas	Milímetros	Libras por Pie Cuadrado
7	.187	4.7	7.871
8	.165	4.2	6.93
10	.135	3.4	5.670
11	.120	3.0	5.040
12	.105	2.7	4.427
13	.090	2.3	3.780
14	.075	1.9	3.154
16	.060	1.5	2.520
18	.048	1.2	2.016
20	.036	0.9	1.512
22	.030	0.8	1.260
24	.024	0.6	1.008
26	.020	0.5	0.756
28	.015	0.4	0.634

En la valoración de la lámina como punto de impacto ya calculado previamente, se parametriza para obtener como resultado piezas con mayor calidad y diseños de matrices que se pueden producir con máxima confianza.

En la figura 5, se muestra la forma del troquel y las cinco principales características que se analizaron por medio de FEA en donde, el modelo solo se observa en dos dimensiones y fue evaluado en el contexto lineal de la deformación en la placa de acero AISI 1023.

Para el diseño del troquel, solo se especificó, la superficie de contacto y se analizaron los puntos que inciden en la fatiga de la chapa metálica, considerando los siguientes aspectos:

- Anclas: en bastidor superior e inferior así como en base desecho de la chapa metálica.
- Fuerza: 30,000 N en la zona de impacto.
- Malla: Tipo de malla octaedros, con un tamaño de 0.25 mm en la superficie de apoyo con tolerancia de 1 mm, en la zona ce corte tamaño de malla 0.05 mm. Con tolerancia de 0.01 mm.

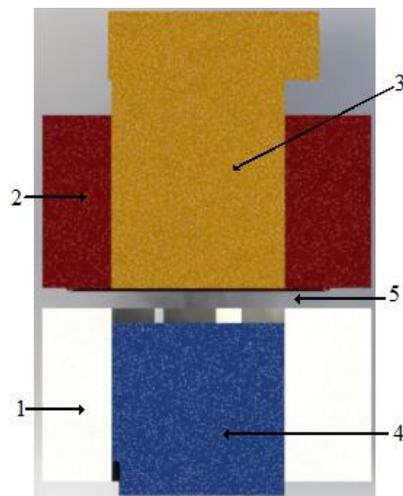


Fig. 5 – Diseño del troquel

Las características y condiciones de frontera en el análisis y evaluación del troquel utilizando elemento finito en 2D, se simplifica solo analizando 5 elementos del troquel.

- Plato de corte
- Plato guía
- Punzón sujeción superior
- Eyector
- Chapa metálica

La figura 6 se aprecia el análisis por elemento finito en donde se determinó un esfuerzo a la fatiga de 290 MPa, además el mayor desgarré se visualizó en los extremos.

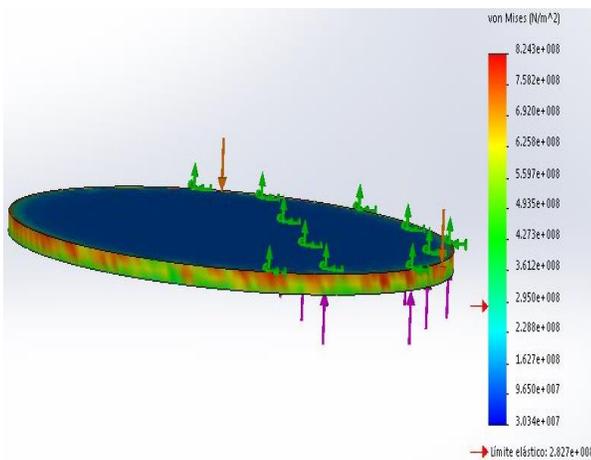


Fig. 6 - Modelo línea de la chapa metálica y su deformación.

Para el diseño del troquel, solo se especificó, la superficie de contacto y se estudiaron los puntos que inciden en la fatiga de la chapa metálica, en la figura 8 se muestran los aspectos de anclaje y esfuerzos identificados para su modelado en dos dimensiones, considerando los siguientes aspectos:

- Anclas: en bastidor superior e inferior y en la parte derecho de la chapa metálica.
- Fuerza 1: 92,245 N en la zona de impacto.
- Fuerza 2: 104,144 N en la zona del anillo perimetral.
- Fuerza 3: 385,237 N en la zona de contrapresión.
- Malla: Tipo de malla octaedros, con un tamaño de 0.25 mm en la superficie de apoyo con tolerancia de 1 mm, en la zona de corte tamaño de malla 0.05 mm con tolerancia de 0.01 mm.

Los datos de la tabla de referencia del acero del AISI 1023 Carbón Steel (UNS G10230) en la figura 7, se muestran los valores del límite elástico (360 MPa) y el límite de fluencia (425 MPa) se encuentran dentro de la zona de máximo esfuerzo.

Comprobando los datos de tabla del acero AISI 1023 con la gráfica de esfuerzo deformación se validaron los resultados del modelo evaluado por elemento finito, los valores se localizaron dentro de los límites permisibles para su máxima deformación y su desprendimiento, para la forma de la chapa metálica.

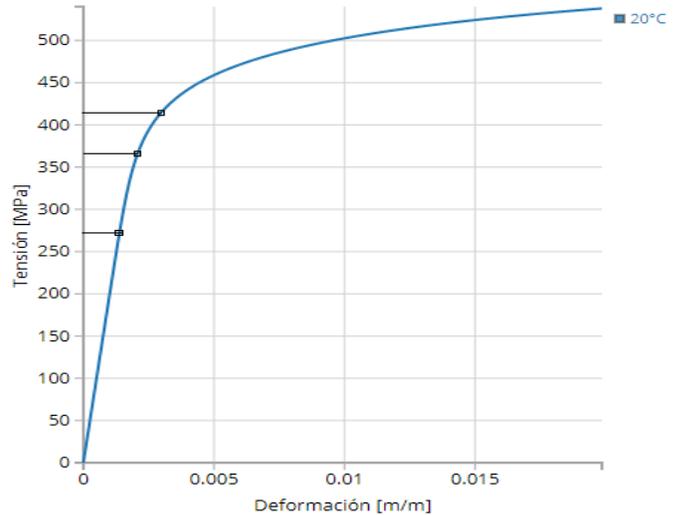


Fig. 7 – Gráfica esfuerzo deformación del acero AISI 1023 (UNS G10230)

[5]

### 3. Conclusiones

La determinación de los esfuerzos simulados bajo el criterio de von Mises en la chapa metálica muestran un esfuerzo máximo de 361 MPa, este esfuerzo es menor al esfuerzo de fluencia, definido en el cálculo por tensión el cual es de 435 MPa, por lo tanto indica que el valor de la chapa metálica está en la zona plástica y permite el corte por el perímetro de la geometría establecida.

Los materiales a seleccionar para la generación del troquel es un factor determinante entre el desprendimiento de material y la durabilidad de la matriz de corte, esto coadyuva a evaluar los ciclos de vida del molde matriz, así como los calibres de lámina a cortar.

Con la evaluación de los esfuerzos para realizar el corte de la chapa metálica, se calcularon los esfuerzos de von Mises para todos los elementos involucrados en el troquel, el esfuerzo máximo para los dados de corte fueron de 282 MPa. Aplicando un factor de seguridad de 3 se obtuvo que el componente es alto, es decir, el diseño propuesto cumple con las características.

Las distancia relativas entre el anillo perimetral y las tolerancias de corte se consideran como factor de la unión que favorece el desprendimiento de material sin existir fatiga sobre la zona de la matriz de corte y el anillo perimetral.

## 5. Referencias

En esta sección, todas las referencias citadas en el artículo deberán ser listadas en el orden el que fueron referidas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de la forma deseada de incluirlas.

- [1] ASM Handbook Volume 14-B Metalworking: Sheet Forming; Fine Edge Blanking; pág. 177-190. Publisher: ASM International, Published: October 01, 1990, ISBN: 978-0-87170-378-1, [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org).
- [2] SOTO, J.M., 2014. Diseño de un troquel progresivo [en línea]. Septiembre 2014. S.I.: UNICAN. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/5855/371367.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [3] DJAVANROODI, F., PIRGHOLI, A. y DERAKHSHANI, E., 2010. FEM and ANN Analysis in Fine-Blanking Process. *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 8, pp. 864-872. ISSN 1042-6914, 1532-2475. DOI 10.1080/10426910903367444.
- [4] ADAMUS, J., LACKI, P. y WIĘCKOWSKI, W., 2011. Numerical Simulation of the Fine Blanking Process of Sheet Titanium. *Archives of Metallurgy and Materials* [en línea], vol. 56, no. 2. [Consulta: 8 abril 2019]. ISSN 1733-3490. DOI 10.2478/v10172-011-0046-4. Disponible en: <http://content.sciendo.com/view/journals/amm/56/2/article-p431.xml>.
- [5] CERÓN HOYOS, J.E., 2013. DESARROLLO DE ASPECTOS METODOLÓGICOS EN EL DISEÑO DE MATRICES PROGRESIVAS [en línea]. Santander: Universidad de Cantabria. Disponible en: <https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/2570>.

## 5. Biografías

Fernando Alejandro Villa Martínez, Maestro Manufactura Avanzada por el Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Tecnológica de Aguascalientes, formación en Ingeniería Mecánica con especialidad en Robótica y Coordinador del Centro Nacional de Diseño Avanzado PLM y coordinador de la academia de diseño y automatización industrial. Sus líneas de investigación son: Diseño racional, selección, manufactura y explotación de elementos de máquinas en sistemas mecánicos y mecatrónicos.

Norma Aurea Rangel Vázquez, Doctora en Ciencias en Polímeros por el Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1. Sus líneas de investigación comprenden: Síntesis y Caracterización de Polímeros, Simulación de Procesos y Modelación de Propiedades Físicoquímicas. ha publicado más de 15 artículos en revistas científicas indizadas, capítulos de libro y artículos de divulgación incluyendo la edición de libros y diversas participaciones en congresos nacionales e internacionales. Ha dirigido varias tesis de posgrado y es árbitro regular de diferentes revistas internacionales tales como *Journal of Applied Polymer Science*, *Materials Letters*, *Journal Polymer Engineering & Science*, *Thermochimica Acta*, *Journal of Molecular Structure* and *Journal of Surface and Coatings Technology*, entre otras.

Christian Irving Enrique Rodríguez González, Maestro Manufactura Avanzada por el Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, Profesor de Tiempo Completo en la Universidad Tecnológica de Aguascalientes, formación en Ingeniería Mecánica y Coordinador de academia de Mecánica, Sus líneas de investigación son: Diseño racional, selección, manufactura y explotación de elementos de máquinas en sistemas mecánicos y mecatrónicos.

# Nodo Sensor/Actuador para Sistema de Gestión de Energía para Edificios

J.Hoyo-Montaña<sup>1,a</sup>, D.Espejel-Blanco<sup>2,b</sup>, J.Enriquez-Rojas<sup>1,c</sup>, R.Galaz-Bustamante<sup>1,d</sup>,

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Hermosillo, DEPI

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, DEPI

<sup>a</sup> j.hoyo@ieee.org, <sup>b</sup> dfespejel@hotmail.com, <sup>c</sup> arturo.enriquez.rojas@gmail.com, <sup>d</sup> rafael\_galaz\_b@yahoo.com.mx

**Resumen**— El presente artículo presenta la implementación de una red de sensores/actuadores para el control de equipos HVAC, como parte de un Sistema de Gestión de Energía en Edificios (BEMS). En la etapa desarrollada se tienen tres nodos: nodo termostato, nodo de sensado de consumo de energía eléctrica y nodo concentrador (puerto de salida). El sistema emplea dispositivos XBee3 para implementación de la red de sensores inalámbrica, y un Raspberry Pi 3 para el puerto de salida. El control y despliegado de información del HVAC se realiza a través de la plataforma de IoT Ubidots, la cual permite un rápido desarrollo de tableros de visualización. La transferencia de información entre Ubidots y el nodo de Raspberry Pi se realiza empleando el protocolo MQTT por un canal seguro.

*Palabras clave.* Sistema de Gestión de Energía, BEMS, Redes de Sensores Inalámbricas.

## 1. Introducción

El mercado de casas inteligentes; donde se integran tecnologías para confort, entretenimiento, y seguridad, entre otras funciones; es un mercado que se estima crecerá de los \$54,140 Millones de dólares en 2016, a \$120,450 Millones de dólares en 2022. Este crecimiento será impulsado por el crecimiento de tecnologías emergentes de IoT. Esta proyección ha hecho que empresas como Apple, Google, Samsung, ABB y Cisco, entre otras, se interesen en este mercado [1].

En los Estados Unidos, el crecimiento de los sistemas de seguridad estará limitado por aspectos de seguridad/privacidad en los enlaces de las aplicaciones de IoT. Empresas como Amazon, McAfee y Nest Labs, serán muy importantes en este sentido. La incorporación de control de voz como alternativa de interfaz hombre máquina en los sistemas de casas inteligentes también será un elemento clave. Otro punto clave para el crecimiento de este mercado, es la incorporación de incentivos por parte de las compañías de generación de energía para controlar la demanda de energía [2].

Según Prism Energy Services [3], en los próximos años se verá una expansión en la implementación de sistemas IoT, y su papel en conectar tecnología a la infraestructura de edificaciones. En particular, en la administración de energía y automatización de operaciones en las instalaciones, incluyendo iluminación, fuego y seguridad en tiempo real.

El reporte de Technavio [4] pronostica un crecimiento del 19% en la tasa de crecimiento anual compuesto del 2017 al 2021 en los sistemas de administración de energía del hogar. Algunos de los factores que impulsan el crecimiento de los sistemas de administración de energía del hogar son el desarrollo de termostatos y lámparas inteligentes que proporcionan confort y conveniencia para los usuarios, así como la reducción de sus costos a corto plazo. Los actores clave en este crecimiento son Cisco, Honeywell, Panasonic y Schneider Electric, entre otros. También se verá una segmentación del mercado en cuatro rubros principales: controladores centrales avanzados, termostatos programables, control de iluminación, y sistemas de auto monitoreo.

## 2. Sistemas de Gestión de Energía

El ahorro de energía en edificios, requiere del desarrollo e instalación de diferentes tipos de nodos de sensores para mantener un monitoreo del uso de energía y de las condiciones ambientales. Estos sensores envían sus mediciones a un sistema de control y monitoreo central, en los cuales se analizan empleando diferentes tipos de algoritmos. Los algoritmos sirven para generar acciones de control que son enviadas a nodos de actuadores que son responsables de controlar diferentes cargas en el edificio, tales como lámparas, equipos de Calefacción, Ventilación y Acondicionamiento de Aire (HVAC, por las siglas de Heating, Ventilation and Air Conditioning) [5].

Un sistema de gestión y monitoreo de energía en edificios tiene como función el recolectar y analizar en tiempo real el consumo de energía. Al emplear datos de tiempo real, es posible realizar un control y gestión del consumo de energía del edificio buscando siempre un consumo de energía optimizado [6].

Un Sistema de Gestión de Energía (EMS, por las siglas en inglés de Energy Management System) es un sistema inteligente que apoyado en las TIC's (Tecnologías de la Información y Comunicaciones), monitorea, controla y optimiza la generación, transmisión y consumo de la energía eléctrica [7], [8]. Un EMS está compuesto de Hardware y

Software que trabaja de manera conjunta para controlar y optimizar el consumo de energía.

En particular un Sistema de Gestión de Energía en Edificios (BEMS, por las siglas en inglés de Building Energy Management System), hace uso de nodos sensores para monitorear variables ambientales del interior del edificio (temperatura, humedad e iluminación), el resultado del monitoreo se emplea para controlar los equipos de iluminación y HVAC del edificio para reducir el consumo de energía [9], y es en esencia un sistema de control distribuido dentro de los edificios que monitorea y gestiona la iluminación, los elevadores, el acondicionamiento de aire, la ventilación, la calefacción y otros usos de la energía [10]. Los BEMS pueden ser descritos como sistemas de control electromecánicos habilitados con tecnología de la información para encargarse de un análisis de energía detallado y la gestión energética completa del edificio [11].

Los BEMS son componentes esenciales de los edificios modernos, encargado de requisitos aparentemente contradictorios, minimizar el consumo de energía mientras se mantiene el confort de sus ocupantes [12].

El consumo de energía que aportan los edificios a nivel mundial es lo suficientemente elevado como para atraer la atención y ser estudiado para reducirlo [13]. Una opción viable para la reducción de energía en edificios es la implementación de BEMS [14]. Lo anterior debido a que los edificios existentes a menudo consumen más energía de la que deberían consumir, esto se debe generalmente al diseño del mismo [15], por deficiencias y errores en el proceso de construcción desde los planos del edificio y en la instalación de las redes eléctrica, hidráulica y de ventilación. El objetivo primordial de la eficiencia energética en edificios es la conservación y reducción de la energía en los procesos de operación del edificio a través del control en el consumo de energía [16]. Para lograr eficiencia energética en los edificios, la optimización de los sistemas de HVAC es particularmente muy importante dado que el consumo de energía de esos sistemas es afectado por las condiciones de operación así como por las necesidades de enfriamiento y calefacción del edificio [17]. El lograr ahorrar energía en los procesos de HVAC (del inglés Heating, Ventilation and Air Conditioning) e iluminación durante la etapa de operación del edificio, tratando de mantener el confort en los ocupantes, puede ser una de las estrategias principales para alcanzar la eficiencia energética en los edificios [18]. La iluminación artificial es también un área en la que se pueden lograr ahorros de energía a costos razonables en edificios nuevos y en proyectos de reconversión [19]. De acuerdo con [20] algunas barreras para lograr estos ahorros estarían relacionados a la dificultad de apagar las luces en la noche

cuando se extienden los tiempos de uso de los edificios, problemas de aceptación por parte del usuario relacionados con los niveles de poca luz propuestos o con los sistemas de control de apagado y regulación de luz diurna.

Para [21] la parte más importante de un BEMS es monitorear las condiciones ambientales interiores del edificio por varios sensores y las mediciones de los consumos de energía por varios medidores. Por ello es muy importante identificar como los sensores forman parte de la arquitectura de un BEMS.

En [14], en la arquitectura de BEMS heredado, los sensores son pieza fundamental para controlar los consumos de los sistemas de iluminación y de HVAC instalados en el edificio. Lo mismo sucede con la Arquitectura de BEMS basados en Inteligencia Computacional con la diferencia de que en esta arquitectura es posible añadir sensores nuevos y sensores adaptados, además de permitir la interacción de los usuarios en el sistema y la posibilidad de añadir sistemas de generación local y almacenamiento de energía.

### 3. Sistema Propuesto

Para el control y monitoreo de equipos HVAC, se propone un esquema de monitoreo y control adecuado para un equipo de tipo central, donde el termostato se encuentra alejado de la unidad principal que contiene al compresor y el abanico, tal como se muestra en la figura 1. El esquema incluye un termostato basado en un módulo XBee3 programado en micro-Python, en el cual se pueden programar los puntos de operación deseados, tales como temperatura deseada y tamaño de la ventana de variación de temperatura, variables que se requieren para una operación con histéresis. El módulo mide los niveles de temperatura y humedad relativa para generar los comandos de activar/desactivar para el compresor y el abanico.

El segundo módulo XBee, se emplea para la medición de la energía eléctrica consumida por el equipo de Aire Acondicionado. Ambos módulos envían su información a un nodo concentrador basado en una computadora de tarjeta única (Single Board Computer en inglés, SBC) tipo Raspberry Pi 3, la cual realiza funciones de puente (Gateway) entre los nodos de sensado e Internet.

Para la implementación del termostato, se seleccionó el sensor HDC2080 de Texas Instruments. El HDC2080 mide temperatura en el rango de  $-40$  a  $85$  °C, con variaciones máximas de  $\pm 0.4$ °C, y humedad relativa en un rango de 0 a 100 por ciento, con variaciones de  $\pm 3\%$ . El sensor cuenta con un interfaz I2C para su comunicación con microcontroladores, una resolución de 11 bits y tiempos de conversión máximos de 400  $\mu$ s. El esquema de conexión se muestra en la figura 2.

Para reemplazar los relevadores electromagnéticos utilizados normalmente en un termostato con señales de control de 24Vca, se implementaron relevadores de estado sólido

basados en un arreglo de optoaislador y TRIAC, tal como se muestra en la figura 2.

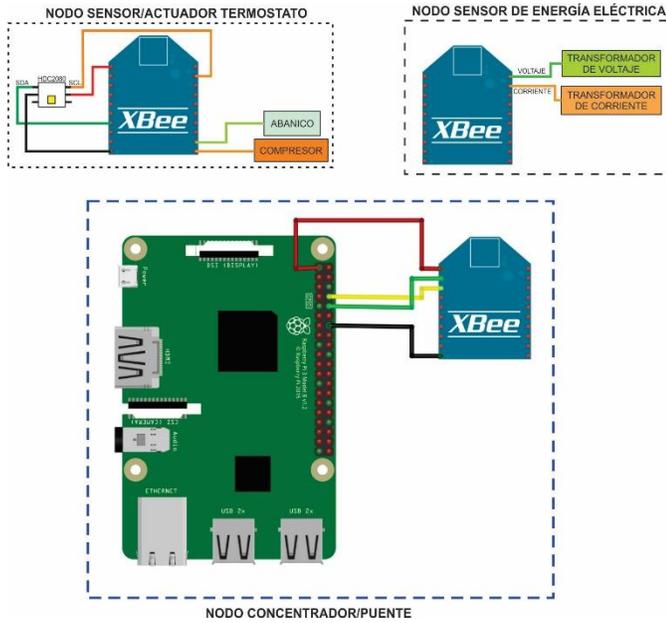


Fig 1. Esquema general de la red de sensores.

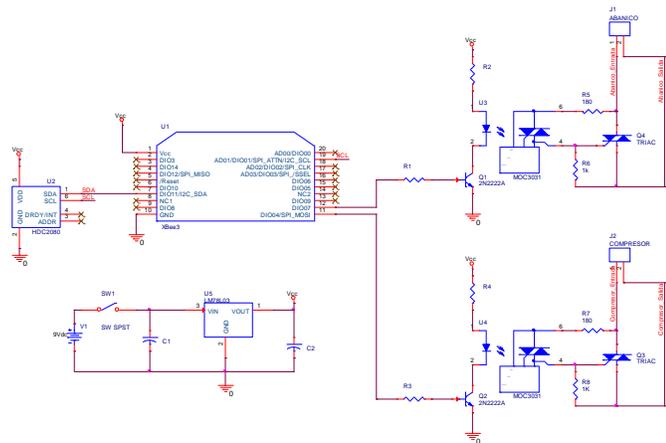


Fig 2. Diagrama esquemático del Nodo Sensor/Actuador Termostato.

Debido a que tanto la temperatura como la humedad relativa en una habitación o zona de enfriamiento, son variables de evolución lenta, por lo que se definió un tiempo de muestreo de 10s para estas variables. Este tiempo de muestreo permita al módulo realizar tareas de formateo de los datos sensados y del estado de las salidas de control de abanico y compresor para su transmisión al nodo concentrador, así como para estar pendiente de transmisiones del nodo concentrador de nuevos puntos de operación de temperatura y ventana de variación.

El nodo de medición de consumo de energía eléctrica está basado en un esquema simple de muestreo de señales aisladas, utilizando un transformador TRIAD F10-110-C2 de 115Vac a 5Vac y un transformador de corriente TT Electronics HM31-

20050LF con relación 1:50 y corriente máxima de 20A. El diagrama del módulo se muestra en la figura 3. La digitalización de las señales de voltaje y corriente se realiza empleando los ADC de 11 bits de resolución del XBee 3 con una frecuencia de muestreo de 1 kps. En el módulo se realiza un pre-procesamiento para obtener el valor RMS de voltaje y corriente de un vector de 5,000 muestras. Estos valores RMS se envían al módulo concentrador cada 5 segundos. El cálculo de la potencia consumida se lleva a cabo en el módulo concentrador previo al envío de información al servidor IoT.

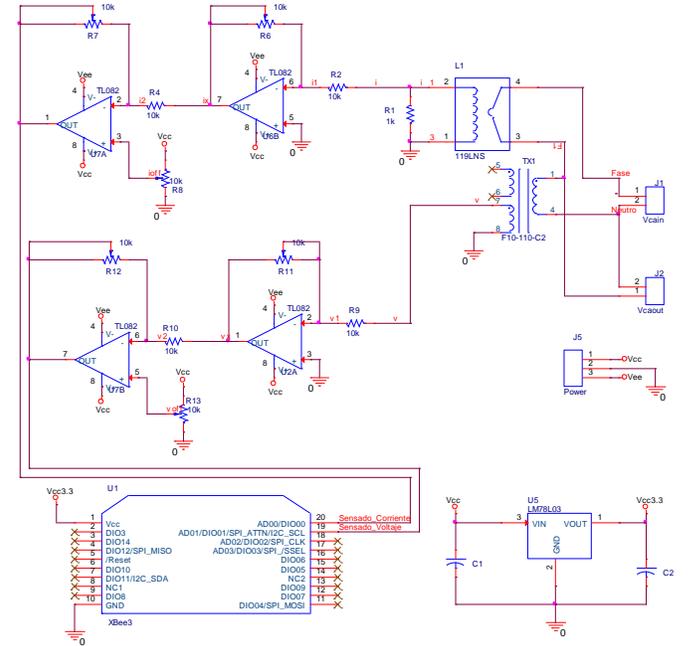


Fig 3. Diagrama esquemático del Nodo Sensor de Energía Eléctrica.

El nodo concentrador es el puente entre los nodos sensores e Internet. El nodo recibe comandos de puntos de activación y puntos de operación provenientes de una aplicación IoT, también envía información de la operación del equipo HVAC hacia la aplicación IoT. Para que el equipo de HVAC se active, se requiere que desde la aplicación IoT se envíe una señal de habilitación (interruptor principal), sin esta señal el termostato no puede activar las salidas de control para compresor y abanico.

El activado/desactivado del compresor responde a la siguiente ley de control:

$$compresor = \begin{cases} 1, & \text{Si } Temp > Toper + \frac{1}{2} Vent \\ 0, & \text{Si } Temp < Toper - \frac{1}{2} Vent \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

- Temp es la temperatura sensada,
- Toper es el punto de operación deseado,
- Vent es la ventana de variación de temperatura,
- 1 activa compresor, y
- 0 desactiva compresor.

Para la activación/desactivación del abanico, se emplean valores de temperatura y humedad relativa. De acuerdo a la norma ASHRAE-55-2010 [22], los equipos de aire acondicionado operan de una manera más eficiente cuando la humedad relativa del ambiente está por debajo de 60%, por lo que la ley de control para el abanico incluye este parámetro:

$$abanico = \begin{cases} 1, & \text{Si } (compresor = 1) \text{ ó } (HR \geq 60) \\ 0, & \text{Si } (compresor = 0) \text{ y } (HR < 60) \end{cases} \quad (2)$$

Donde

HR es la humedad relativa sensada,  
 1 activa el abanico, y  
 0 desactiva el abanico.

A continuación, se presenta la implementación y resultados obtenidos.

#### 4. Resultados

El sistema está implementado en la parte de hardware usando módulos XBee3 para la implementación de los nodos sensor/actuador, y el nodo concentrador es un arreglo de un módulo XBee3 y un Raspberry Pi 3, tal como se muestra en la figura 1. La información recolectada por el nodo concentrador es transferida a la plataforma Ubidots para su procesamiento y desplegado. El despliegue del sistema se ha dividido en dos etapas, la primera se refiere a la implementación del termostato, la cual se tiene completada al 100%. La figura 4 muestra el tablero de despliegue y control (Dashboard) desarrollado.

El tablero mostrado en la figura 4, incluye un interruptor general del equipo (HVAC\_SW), controles deslizantes para fijar temperatura deseada (T\_setpoint) y tamaño de la ventana de variación de la temperatura (HVAC\_ventana), así como como indicadores de temperatura sensada (Temperatura1), estado del equipo (HVAC\_status) y de operación fuera de la ventana de operación definida (Temperatura\_alta y Temperatura\_baja).

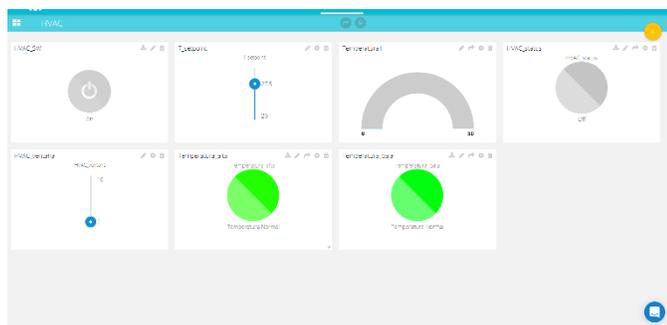


Fig 4. Diagrama esquemático del Nodo Sensor/Actuador Termostato.

La transferencia de datos a la plataforma Ubidots se realiza empleando protocolo MQTT por un canal seguro (8883) desde el nodo concentrador basado en una Raspberry Pi 3. El desarrollo del programa de adquisición de datos y su

transferencia a Ubidots se realizó en Python, para lo cual se instaló el módulo Ubidots Python API Client.

El diagrama de la figura 5 muestra el proceso implementado en Python para el control de los nodos sensor/actuador y la comunicación con Ubidots.

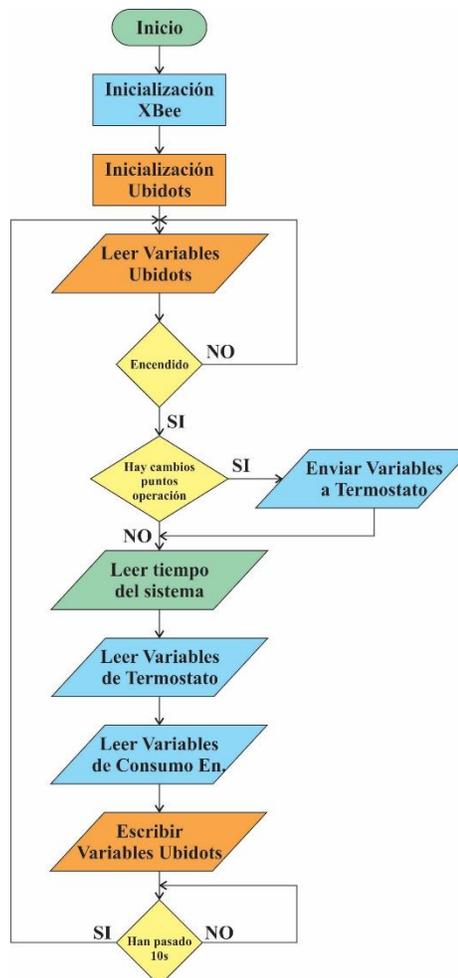


Fig 5. Diagrama de bloques del programa en Python del nodo concentrador.

La parte del módulo de sensado de energía eléctrica se encuentra aún en desarrollo, actualmente se está trabajando en la calibración de la tarjeta de adquisición de datos para su conexión hacia el XBee3. La figura 6 muestra una foto de la tarjeta.

El nodo de termostato ha sido probado empleando la plataforma Ubidots, con resultados satisfactorios, se requieren de más pruebas en conjunto con el sensor de consumo de energía para completar la evaluación de desempeño del sistema propuesto.

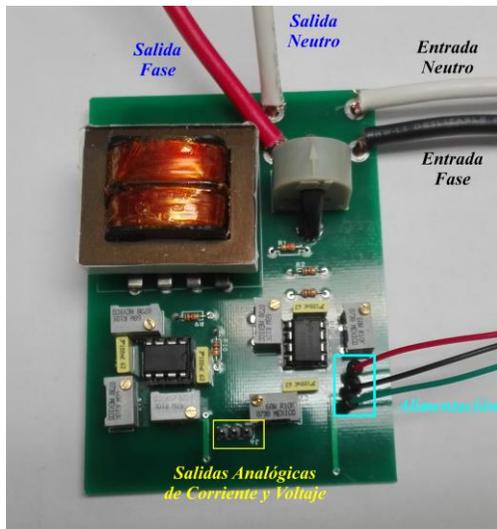


Fig 6. Tarjeta de sensado de energía eléctrica.

## 5. Conclusiones

El sistema ha sido evaluado de manera parcial en su funcionamiento, se espera que para agosto se tengan resultados del sistema completo, sin embargo, el funcionamiento del sistema hasta el momento ha sido satisfactorio.

## 4. Referencias

[1] Mordor Intelligence, "IoT in Manufacturing Market Size | Trends | Forecast to (2017-2022)," *Internet of Things (IoT) in Manufacturing Market - Growth, Trends, Industry Analysis, Forecast (2017-2022)*, 2017. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/internet-of-things-in-manufacturing-market>. [Accessed: 28-Dec-2017].

[2] Parks Associates, "Top 10 IoT trends for 2017," 2017.

[3] Prism Energy Services, "New Energy Management Trends for 2017," 2017. [Online]. Available: <http://www.primenergyservices.com/energy-management-trends-2017/>. [Accessed: 23-Sep-2017].

[4] Technavio, "Global Home Energy Management Systems Market 2017-2021 | Market Research Reports - Industry Analysis Size & Trends - Technavio," *IRTNTRI2162*, 2017. [Online]. Available: <https://www.technavio.com/report/global-smart-grid-global-home-energy-management-systems-market-2017-2021>. [Accessed: 23-Sep-2017].

[5] N. Mohamed, S. Lazarova-Molnar, and J. Al-Jaroodi, "CE-BEMS: A cloud-enabled building energy management system," in *2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, 2016, pp. 1–6.

[6] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, M. Farrag, M. F. A. Ahmed, and A. Ali, "Design and implementation of building energy monitoring and management system based on wireless sensor networks," in *2015 Tenth International Conference on Computer Engineering & Systems (ICCES)*, 2015, pp. 230–233.

[7] Y.-C. Lee, C.-Y. Chuang, Y.-C. Chen, and C.-W. Hsueh, "An efficient scheduling mechanism for building energy management systems," in *2015 IEEE International Conference on Building Efficiency and Sustainable Technologies*, 2015, no. September, pp. 17–22.

[8] H. Ghorbanpanah, M. H. Y. Moghaddam, A. Saeedi, and S. Alishahi, "Design and implementation of building energy monitoring system using wireless sensor networks," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, no. 0867, pp. 0867–0867.

[9] M. Honda, T. Sakurai, and M. Takamiya, "Wireless temperature and

illuminance sensor nodes with energy harvesting from insulating cover of power cords for building energy management system," in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2015, vol. 3, no. 26630149, pp. 1–5.

[10] K. Zhang, Q. Wu, and X. Li, "Relay participated-new-type building energy management system: An energy-efficient routing scheme for wireless sensor network-based building energy management systems," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 13, no. 1, 2017.

[11] K. Aduda, W. Zeiler, and G. Boxem, "Smart Grid - BEMS: The Art of Optimizing the Connection between Comfort Demand and Energy Supply," in *2013 Fourth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*, 2013, vol. 2050, pp. 565–569.

[12] D. Wijayasekara, O. Linda, M. Manic, and C. Rieger, "Mining Building Energy Management System Data Using Fuzzy Anomaly Detection and Linguistic Descriptions," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 3, pp. 1829–1840, Aug. 2014.

[13] A. I. Dounis and C. Caraiscos, "Advanced control systems engineering for energy and comfort management in a building environment-A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1246–1261, 2009.

[14] M. Manic, D. Wijayasekara, K. Amarasinghe, and J. J. Rodriguez-Andina, "Building Energy Management Systems: The Age of Intelligent and Adaptive Buildings," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 1, pp. 25–39, Mar. 2016.

[15] E. Mills, "Building commissioning: A golden opportunity for reducing energy costs and greenhouse gas emissions in the United States," *Energy Effic.*, vol. 4, no. 2, pp. 145–173, 2011.

[16] J. Oak, R. R. A. Issa, and I. Flood, "Smart Building Energy Management Systems (BEMS) Simulation Conceptual Framework," *Proc. 2016 Winter Simul. Conf.*, pp. 3237–3245, 2016.

[17] J. Choa, S. Shina, J. Kimb, and H. Hongc, "Development of an energy evaluation methodology to make multiple predictions of the HVAC&R system energy demand for office buildings," *Energy Build.*, vol. 80, pp. 169–183, 2014.

[18] F. Oldewurtel, D. Sturzenegger, and M. Morari, "Importance of occupancy information for building climate control," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 521–532, 2013.

[19] M. S. Gul and S. Patidar, "Understanding the energy consumption and occupancy of a multi-purpose academic building," *Energy Build.*, vol. 87, pp. 155–165, Jan. 2015.

[20] M.-C. Dubois and Å. Blomsterberg, "Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review," *Energy Build.*, vol. 43, no. 10, pp. 2572–2582, Oct. 2011.

[21] J. W. Kim, Y. K. Jeong, and I. W. Lee, "Implementation of automatic sensor and meter arrangement system," in *2014 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2014, pp. 730–733.

[22] ASHRAE, "ASHRAE Standard 55-2010," Atlanta, GA, 2010.

## 5. Biografías

José Antonio Hoyo Montaña nacido en Mexicali, Baja California, México, en 1964. Recibió su grado de Ingeniería industrial y electrónica en 1989 por el Instituto Tecnológico de Hermosillo, y su maestría en ciencias y doctorado por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en el 2000 y 2005 respectivamente. Desde el 2005, es profesor de tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo. Se interesa en estudiar acerca del control digital de sistemas electrónicos de potencia, manejo de la energía e iluminación de estado sólido.

Daniel Fernando Espejel Blanco nació en Hermosillo, Sonora, México, en 1974. Recibió el título de Ingeniería en Ingeniería Industrial en Electrónica en 1996 del Instituto Tecnológico de Hermosillo, México, y Maestro en Ciencias en Ingeniería Industrial por la misma Institución en 2001. Desde 1997, Daniel Fernando Espejel-Blanco es profesor a tiempo completo en el Instituto Tecnológico de Hermosillo. Actualmente se encuentra realizando sus estudios

doctorales en el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Sus intereses de investigación incluyen Sistemas de Eficiencia Energética, Sistemas de Gestión de Energía para Edificios, Ahorro de Energía y Renovación de Sistemas Energéticos.

José Enríquez Rojas, estudió Ingeniería Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Hermosillo y es parte de la generación 2018. Actualmente se encuentra realizando los trámites administrativos para obtener el título de Ingeniero Mecatrónico.

Rafael Armando Galaz Bustamante, nació en Nacoziari de García, Sonora en 1962, se recibió de Ingeniería Industrial en Electrónica en 1988 en el Instituto Tecnológico de Hermosillo, y como Maestro en Ciencias en Ciencias Computacionales en el Instituto Tecnológico de Nogales en 2000. Trabajando como Maestro de Tiempo Completo en el Instituto Tecnológico de Hermosillo desde 1987, especializándose en el área de Sistemas de Control y Robótica.

# Análisis y validación estructural como estrategia para consolidación de producto

P. Ojeda

Universidad Tecnológica de Aguascalientes, División de Electromecánica Industrial y Energías  
pedro.ojeda@utags.edu.mx

**Resumen**—En el proceso del desarrollo de productos destinados a cubrir necesidades o requerimientos específicos es determinante, hablando en términos de funcionalidad, lograr la interacción de dos estrategias: por un lado, la retroalimentación del usuario final y por el otro, la optimización de arquitectura aplicando análisis de elemento finito (FEA). Buscando la consolidación de un nuevo producto e identificando oportunidades de mejora, en el presente artículo se muestran los resultados de un estudio de FEA aplicado a un multicultivador (caso de estudio) en el cual se tenía como premisas: 1) validación de la propuesta de diseño; 2) evaluación de zonas detectadas como “críticas”; y 3) optimización de geometría para reducir peso y costos de manufactura. Se presenta también, de manera simplificada, el procedimiento utilizado para estructurar el diseño del multicultivador bajo los enfoques de validación de arquitectura, mejora de calidad en producción y reducción de costos.

*Palabras clave:* Diseño, funcionalidad, optimización, validación, manufactura.

## 1. Introducción

Diseñar es establecer y definir soluciones y estructuras pertinentes, para problemas que no han sido resueltos antes o soluciones nuevas planteadas en forma diferente para problemas que previamente ya han sido resueltos. El diseño es parte ciencia y es parte arte. La parte científica del diseño puede ser aprendida a través de las diferentes filosofías, metodologías y herramientas que existen y que tratan de sistematizar dicha tarea. Sin embargo, la parte de arte del proceso de diseño, hoy en día, no puede ser enseñada sistemáticamente. Por lo tanto, muchos diseñadores plantean que la única forma de aprender la parte artística del diseño es diseñando.

FEA es actualmente una poderosa herramienta dentro del sector industrial, con cada solución se representa un vasto panorama de la física matemática, métodos numéricos, interfaces de usuarios y técnicas de visualización. Tan grande ha sido el éxito que se usa tanto para los tradicionales métodos didácticos experimentales y análisis de modelos como para resolver problemas dinámicos. La ayuda de FEA ha sido a la vez inevitable y a la vez progresiva, pues los altos costos y el tiempo asociados con el consumo de la experimentación a menudo han impedido el deseo de producir eficiente profundidad en los resultados.

El presente artículo reporta el procedimiento y los resultados de un estudio de FEA realizado a un multicultivador (caso de estudio) estructurado bajo las premisas: validación de la propuesta de diseño, evaluación de zonas detectadas como “críticas” y optimización de geometría para reducir peso y costos de manufactura. Asimismo, se reportan y discuten los resultados obtenidos del análisis en cada una de las situaciones y casos presentados.

## 2. Sistematización, Análisis y Resultados

### 2.1. Metodología

El diseño y desarrollo de un nuevo producto consiste en extraer la información mediante el seguimiento de una metodología, de la arquitectura propia del producto en cuestión y del detalle procedimental del mismo para poder entenderlo. Es importante mencionar la metodología que se necesita para poder plantear la solución a una necesidad; esto es, para formular o plantear un problema se requiere de un previo análisis del conocimiento en torno a su naturaleza y, por tanto, haber considerado los hechos y conceptos importantes o relevantes en función de los cuales es posible definir en forma sintética el problema en cuestión. Cabe mencionar también que muchas veces se requiere para beneficios del avance de una investigación el que se sigan metodologías ya definidas o se siga alguna variante en base a las ya mencionadas. La Fig. 1 presenta la metodología utilizada para el desarrollo del diseño del multicultivador motivo de estudio en el presente trabajo y que es una integración de los modelos tradicionales desarrollados por Pugh [1], Ullman [2], Ulrich et al [3] y Pahl et al [4].

Para definir el diseño del multicultivador se contemplaron los siguientes enfoques: validación de arquitectura, mejora de calidad en producción y reducción de costos; a partir de los enfoques mencionados, se propusieron y revisaron varias configuraciones para dar solución al problema en estudio. Se conceptualizaron varias configuraciones tomando en cuenta los enfoques definidos y finalmente se generó la arquitectura final del multicultivador. En la Fig. 2, se presenta la geometría final propuesta.

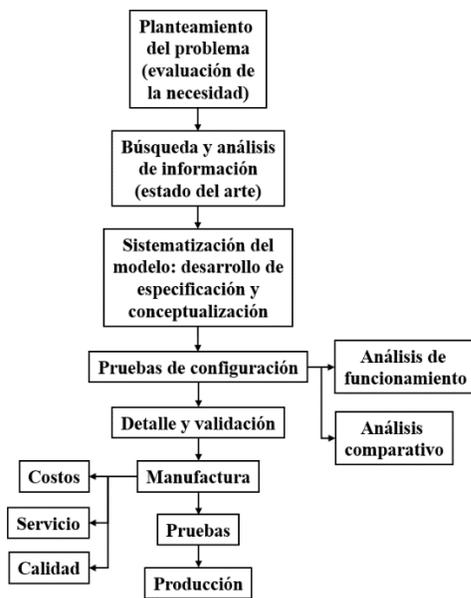


Fig 1. Metodología de Diseño

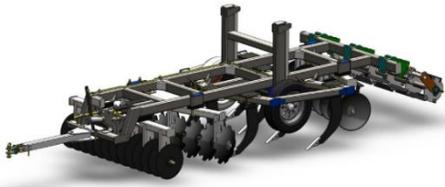


Fig 2. Caso de estudio

## 2.2. Planteamiento del estudio

### 2.2.1. Objetivo del análisis

Analizar la estructura principal del multicultivador para asegurar que pueda soportar las cargas normales de trabajo de una manera aceptable y localizar, en caso de que se presenten, zonas críticas de concentración de esfuerzos y argumentar la posible optimización de dichas zonas.

### 2.2.2. Aplicación de condiciones de frontera

Para definir el tamaño de malla más adecuado para el estudio de elemento finito, se verificaron varios tamaños y debido a las relaciones dimensionales existentes entre los componentes de análisis se seleccionó finalmente una densidad de  $0.375in$ , considerando este tamaño el más óptimo para dicho análisis (ver Figs. 3 y 4).

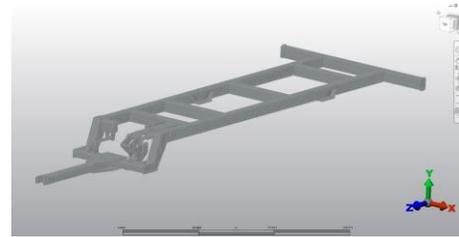


Fig 3. Mallado del chasis del multicultivador

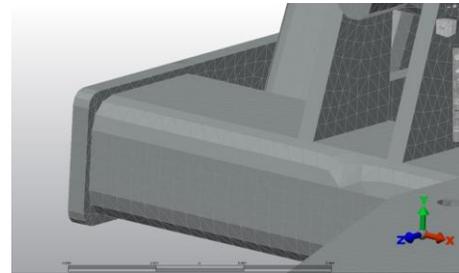


Fig 4. Detalle del mallado del chasis del multicultivador

Las condiciones de cargas propuestas para el análisis por elementos finitos del chasis del multicultivador se definieron en varios grupos para estudiar situaciones diferentes:

- i) Simulación del jalón por parte del tractor y restricción de los grados de libertad en un costado del chasis.
- ii) Simulación del jalón por parte del tractor y restricción de los grados de libertad en ambos costados del chasis.
- iii) Simulación del jalón por parte del tractor y aplicación de una carga transversal en un costado del chasis.
- iv) Simulación del jalón por parte del tractor y restricción de los grados de libertad en uno de los timones del multicultivador como paro repentino por un objeto extraño en el terreno.
- v) Simulación del jalón por parte del tractor y restricción de los grados de libertad en los timones del multicultivador como parte de resistencia del terreno por trabajo normal.

## 2.3. Situaciones de estudio

### 2.3.1. Caso 1: análisis realizado en el chasis del multicultivador simulando el jalón en la parte de enganche con el tractor y restricción de grados de libertad en un costado

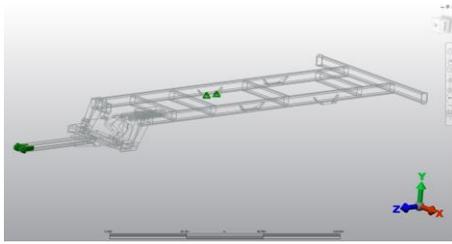


Fig 5. Grupos de cargas aplicados

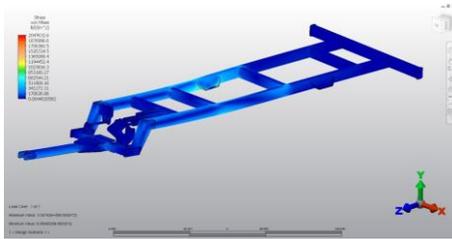
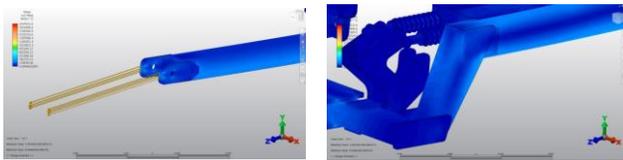
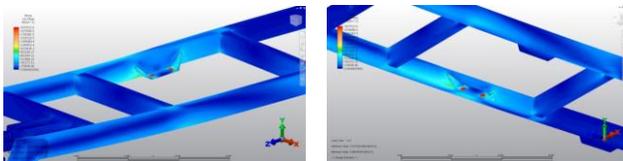


Fig 6. Esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 1



a) Esfuerzos en el enganche

b) Esfuerzos en larguero principal



c) Esfuerzos en área restringida (superior)

d) Esfuerzos en área restringida (inferior)

Fig 7. Detalle de esfuerzos del chasis del Multicultivador para el caso 1

## Análisis de resultados

En este estudio se aplicó al modelo la carga de trabajo normal (jalón) ejercida por el tractor sobre el chasis del multicultivador y se restringieron los grados de libertad en uno de los largueros principales, tal como se muestra en la Fig. 7. El análisis de esfuerzos muestra que las magnitudes de los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Por lo que la estructura del chasis no presentará deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga aplicadas durante proceso de trabajo normal.

### 2.3.2. Caso 2: análisis realizado en el chasis del multicultivador simulando el jalón en la parte de enganche

## con el tractor y restricción de grados de libertad en ambos costados

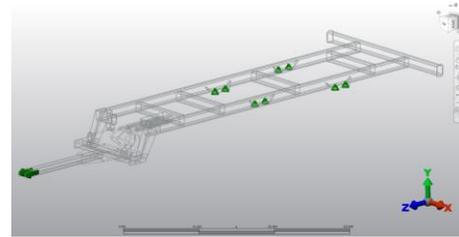


Fig 8. Grupos de cargas aplicados

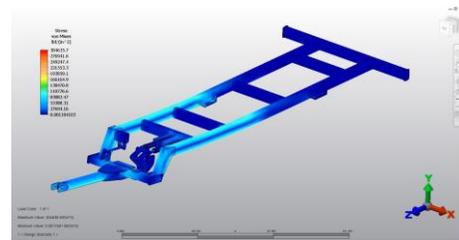
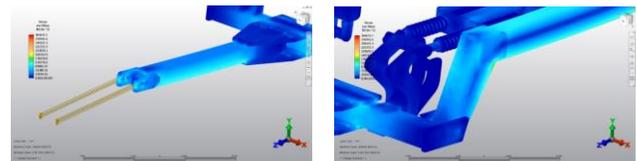
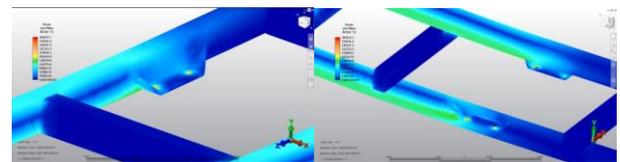


Fig 9. Esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 2



a) Esfuerzos en el enganche

b) Esfuerzos en larguero principal



c) Esfuerzos en área restringida (superior)

d) Esfuerzos en área restringida (inferior)

Fig 10. Detalle de esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 2

## Análisis de resultados

En este estudio se aplicó al modelo la carga de trabajo normal (jalón) ejercida por el tractor sobre el chasis del multicultivador y se restringieron los grados de libertad en ambos largueros principales, tal como se muestra en la Fig. 9. El análisis de esfuerzos muestra que las magnitudes de los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Cabe mencionar que, aunque las magnitudes de los esfuerzos aumentaron con respecto a los resultados en el caso 1, aun así, se mantienen dentro de los rangos normales de deformación del material. Por lo tanto, la estructura del chasis no presentará

deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga aplicadas durante proceso de trabajo normal.

**2.3.3. Caso 3: análisis realizado en el chasis del multicultivador simulando el jalón en la parte de enganche con el tractor y restricción de grados de libertad en un costado**

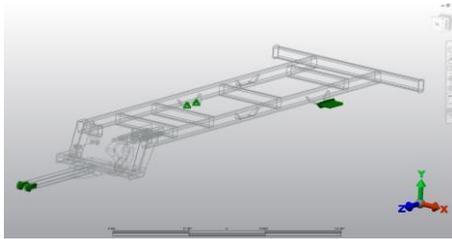


Fig 11. Grupos de cargas aplicados

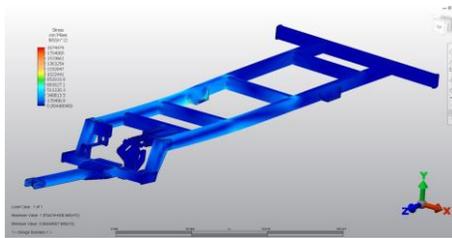


Fig 12. Esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 3

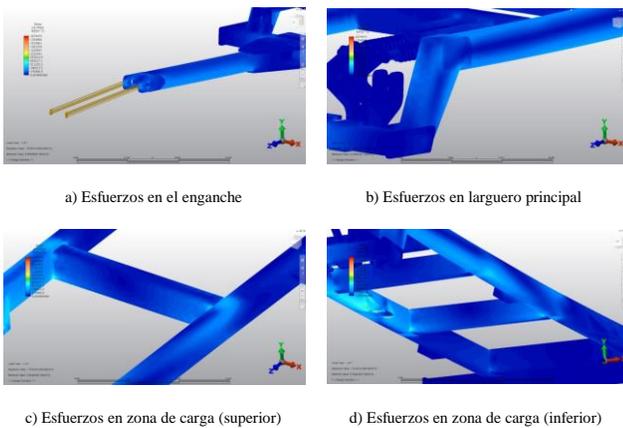


Fig 13. Detalle de esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 3

**Análisis de resultados**

En este estudio se aplicó al modelo la carga de trabajo normal (jalón) ejercida por el tractor sobre el chasis del multicultivador y se aplicó una carga transversal de 50000Lbf

a uno de los largueros principales, tal como se muestra en la Fig. 11. El análisis de esfuerzos muestra que las magnitudes de los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Cabe mencionar que, aunque las magnitudes de los esfuerzos aumentaron con respecto a los resultados en el caso 1, aun así, se mantienen dentro de los rangos normales de deformación del material. Por lo tanto, la estructura del chasis no presentará deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga aplicadas durante proceso de trabajo normal.

**2.3.4. Caso 4: análisis realizado en el chasis del multicultivador simulando el jalón en la parte de enganche con el tractor y restricción de grados de libertad en uno de los timones del multicultivador como paro repentino por un objeto extraño en el terreno**

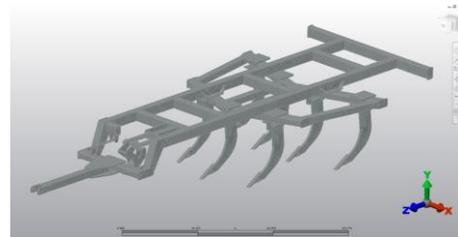


Fig 14. Mallado del chasis y sistema multicultivador

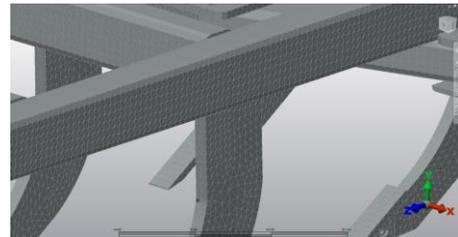


Fig 15. Detalle del mallado del chasis y sistema multicultivador

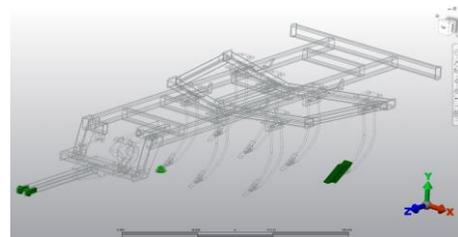


Fig 16. Grupos de cargas aplicados

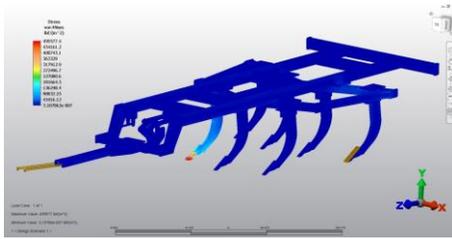


Fig 17. Esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 4

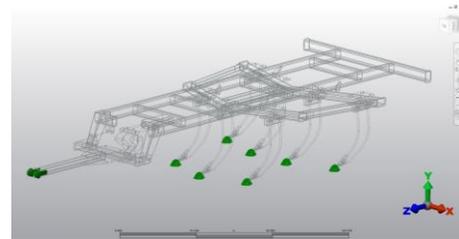


Fig 19. Grupos de cargas aplicados

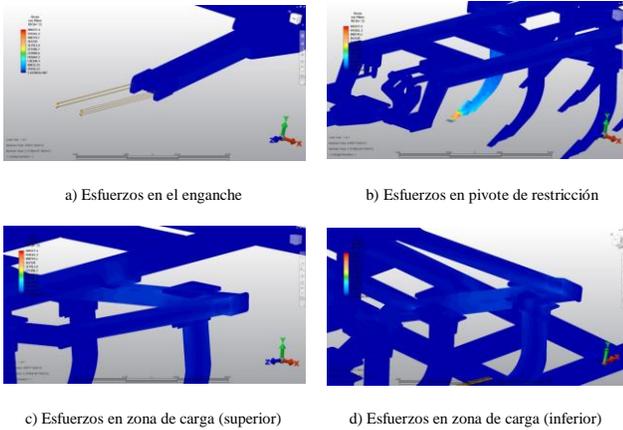


Fig 18. Detalle de esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 4

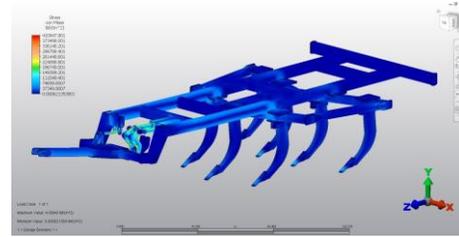


Fig 20. Esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 5

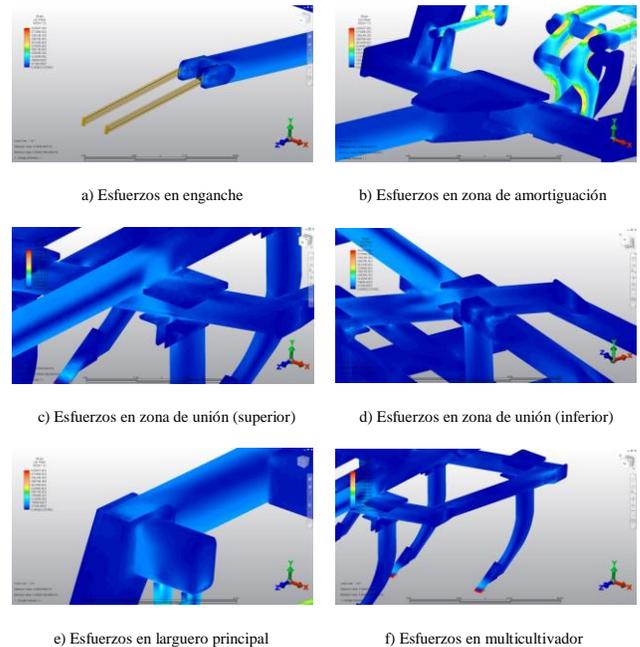


Fig 21. Detalle de esfuerzos del chasis del multicultivador para el caso 5

### Análisis de resultados

En este estudio se aplicó al modelo la carga de trabajo normal (jalón) ejercida por el tractor sobre el chasis del multicultivador y se ubicó un pivote para restringir los grados de libertad en ésta zona. Se aplicó una carga de 7510.70Lbf a uno de los timones para simular un paro repentino por la presencia de un objeto extraño en el terreno de trabajo, tal como se muestra en la Fig. 16. El análisis de esfuerzos muestra que las magnitudes de los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Por lo tanto, la estructura del chasis no presentará deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga aplicadas durante proceso de trabajo normal.

### 2.3.5. Caso 5: análisis realizado en el chasis del multicultivador simulando el jalón en la parte de enganche con el tractor y restricción de grados de libertad en los timones del multicultivador como parte de resistencia del terreno por trabajo normal

### Análisis de resultados

En este estudio se aplicó al modelo la carga de trabajo normal (jalón) ejercida por el tractor sobre el chasis del multicultivador y se restringieron los grados de libertad en los timones del multicultivador para simular la resistencia del terreno por trabajo normal y para repentino de dicho multicultivador, tal como se muestra en la Fig. 19. Como se puede ver en la Fig. 20, la zona de amortiguación del chasis

presenta las magnitudes más altas de esfuerzos. El análisis de esfuerzos muestra que las magnitudes de los esfuerzos están por debajo del límite elástico del material. Por lo tanto, la estructura del chasis no presentará deformaciones permanentes bajo las condiciones de carga aplicadas durante proceso de trabajo normal.

## 2.4. Análisis de resultados global

El estudio de esfuerzos realizado al chasis del multicultivador permite demostrar que todos y cada uno de los elementos que lo integran presentan magnitudes de esfuerzos por debajo del límite elástico permisible del material. En la zona de amortiguación del chasis es en donde se presentan las magnitudes más altas de esfuerzos presentando concentración de esfuerzos en algunos puntos, esto es debido a la geometría misma y trabajo bajo el cual trabajan los elementos de ésta parte. Aun así, estas magnitudes están dentro de los rangos normales de deformación, por lo que, de momento pueden ser despreciados para continuar con el análisis.

Se consideraron los largueros del chasis como elementos críticos para aplicar las cargas por tener las dimensiones mayores y ser partes principales dentro de dicho chasis. De igual manera, se decidió hacer análisis al chasis integrando el multicultivador para asegurar aún más la resistencia que tendrá el implemento en trabajo normal. El análisis nos muestra también que, la estructura del chasis del multicultivador es suficientemente rígida para soportar y absorber las cargas de trabajo a las que estará sometido.

## 3. Conclusiones

El uso, desarrollo e implementación de metodologías para diseño o rediseño de productos basado en nuevas tecnologías, aumenta las probabilidades de alineación en el mercado y el incremento de la transferencia de conocimiento y tecnológica al sector industrial.

Los avances en análisis computacionales y de tecnología permiten a los ingenieros, diseñadores e investigadores contar con eficaces herramientas de diagnóstico y simulación que facilitan, en un momento dado, el diseño, rediseño u optimización de un sistema mecánico.

En este artículo se presentaron los resultados obtenidos del estudio de FEA realizado a un multicultivador con la finalidad de verificar el diseño y fundamentar, en caso de que se presentará, la optimización de geometría para evitar concentración de sistemas de esfuerzos. Por otro lado, con estos resultados fue posible hacer cambios a la estructura

principal del multicultivador y bajo el enfoque de disminución de peso y costos de manufactura fue viable también generar estrategias de aplicación para el ensamble de dicho implemento y, de esta manera, facilitar la alineación a producción en serie.

## 4. Referencias

- [1] Pugh, S. Total Design. Addison Wesley, Great Britain, ISBN 0-201-41639-5, 1990.
- [2] Ullman, D. G. The Mechanical Design Process, Mc. Graw-Hill, New York, ISBN 0-07-112871-9, 1992.
- [3] Ulrich, K.T., Eppinger, S.D. Product design and development, Mc. Graw-Hill, International Editions, ISBN 0-07-113742-4, 1995.
- [4] Pahl, G., Beitz, W. Engineering Design – A Systematic Approach, Springer-Verlag, Great Britain, 1996.
- [5] Zienkiewicz O. C. and Taylor R. L., The Finite Element Method Vol. 1: Basic Formation and Linear Problems, McGraw-Hill, USA, 1989.
- [6] Versteeg, W., An introduction to computational fluid dynamics: the finite element method, Longman Scientific & Technical, 1995.
- [7] Evbuomwan, N.F.O., Sivaloganathan, S., Jebb, A. A Survey of Design Philosophies, Models, Methods and Systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 210: 301–320, 1996.
- [8] Tomiyama, T., Gu, P. Jin., Y., Lutters, D. Kind, Ch., Kimura, F., Design methodologies: Industrial and educational applications, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Elsevier Ltd. Journals, 58: 543-565, 2009.
- [9] Gericke, K., Blessing, L., Comparisons of design methodologies and process models across disciplines: a literature review, International Conference on Engineering Design ICED11, 2011.
- [10] Tran, T., Park, J., Development of integrated design methodology for various types of product – service systems, Journal of Computational Design and Engineering, 1-1:37-47, 2014.
- [11] Kaspar, J., Baehre, D., Vielhaber, M., Material selection based on a product engineering integration framework, 26th CIRP Design Conference, Elsevier Ltd. Journals, 50: 2-7, 2016.

## 5. Biografías

**Pedro A. Ojeda Escoto.** Profesor-Investigador de tiempo completo, miembro del cuerpo académico “Sistemas Mecatrónicos” en la División de Electromecánica Industrial y Energías de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. La línea de generación y aplicación del conocimiento que cultiva dicho cuerpo académico es: Diseño racional, selección, manufactura y explotación de elementos de máquinas en sistemas mecánicos y mecatrónicos. Amplia experiencia en desarrollo de proyectos para el diseño de nuevos productos, de innovación tecnológica, máquinas y dispositivos para propósitos especiales, sistemas mecánicos aplicados. Habilidades en gestión, planeación y administración de proyectos, ejecutando sistemas de seguimiento y control e involucrando de forma eficaz la participación multidisciplinaria.

# Aplicación de Bombas Sumergibles de Acero Inoxidable 316 en Ambientes Corrosivos

A. Torres-Yáñez<sup>1a</sup>, M. A. Rivera-Hernández<sup>1b</sup>, S. Cruz-López<sup>1c</sup>, J.A. Vázquez-Feijoo<sup>1d</sup>, G. Urriolagoitia-Sosa<sup>1e</sup>, E. A. Merchán-Cruz<sup>2</sup>, G.M. Urriolagoitia-Calderón<sup>1f</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Profesional Adolfo López Mateos "Zacatenco", Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n, Edificio 5, 2do. Piso, Col. Lindavista, C.P. 07320, Ciudad de México

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad "Azcapotzalco", El Jagüey, C.P. 02519, Ciudad de México

<sup>a</sup> [ing.arturoty@hotmail.com](mailto:ing.arturoty@hotmail.com), <sup>b</sup> [mijailadalid@gmail.com](mailto:mijailadalid@gmail.com), <sup>c</sup> [salvadorcruzlopezim@gmail.com](mailto:salvadorcruzlopezim@gmail.com), <sup>d</sup> [javazquezfeijoo@yahoo.com.mx](mailto:javazquezfeijoo@yahoo.com.mx),  
<sup>e</sup> [guiurri@hotmail.com](mailto:guiurri@hotmail.com), <sup>f</sup> [urrio332@hotmail.com](mailto:urrio332@hotmail.com), <sup>2</sup> [eamerchan@ipn.mx](mailto:eamerchan@ipn.mx)

**Resumen**— Las bombas sumergibles de acero inoxidable son un gran recurso empleado por la industria, ya que pueden aplicarse en diferentes áreas de aplicación, desde el área alimentaria hasta la minería. En el caso de la minería suelen ser equipos robustos y de uso específico, esto puede ir desde la extracción de minerales hasta instalaciones hidrosanitarias. La principal problemática de ocupar estos equipos en la minería es que deben ser capaces de soportar ambientes corrosivos. En el caso de la lixiviación se emplea ácido sulfúrico diluido, el cual es altamente corrosivo. Por eso se ocupan equipos en acero inoxidable 316, el cual soporta este tipo de ambientes. Como se trata de un ácido altamente contaminante, se requiere usar sistemas de detección de fugas donde se almacena la lixiviación. Para estos es posible usar bombas sumergibles de acero inoxidable para prevenir contingencias por una fuga en los repesos de almacenamiento.

**Palabras clave.** Sumergibles, acero inoxidable, corrosivo, lixiviación, repesos.

## 1. Introducción

En las diversas aplicaciones de la Ingeniería, hay diferentes tipos de equipos construidos en acero inoxidable que se utilizan en el sector industrial. Las áreas más comunes donde se ocupan equipos con estas características son:

Alimentos, farmacéutica, medicina, minería.

Tomando el caso de la industria minera, es necesario entender por qué se emplean equipos que se fabrican con materiales que tienen una mayor resistencia mecánica en lugar de otros materiales. En la minería, es un requisito fundamental que los equipos de construcción y operación deben estar fabricados por materiales que puedan soportar ambientes corrosivos o que tengan protección contra la corrosión, que puede ser pintura especial, cerámica o recubrimientos de polímero.

## 2. Propuesta

Para la correcta aplicación de estos equipos, hay varios puntos clave que deben ser considerados para hacer una

correcta elección. Se deben considerar los procesos de operación, los materiales de fabricación del equipo, las características de las bombas, la instalación, la operación y el mantenimiento.

### A. Procesos de extracción de minerales

Hay diferentes formas de extraer minerales, los tipos más empleados en minas de México son a cielo abierto y bajo tierra. En las minas a cielo abierto existen diferentes procesos en los que se realiza la extracción de minerales, uno de los más conocidos es volar grandes extensiones de tierra y luego transportar el material restante a las fábricas donde se completa la acción de los minerales.

Otro método es formar terreros con el material previamente molido, para esto la extracción de Cobre para el método de lixiviación [1].

El método de lixiviación implica un proceso químico, ya que el ácido sulfúrico se utiliza para obtener Cobre. El producto de lixiviación que llega a los repesos de almacenamiento es ácido sulfúrico diluido (96% agua, 4% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, con 2 gr de Cu por litro).

Mediante el uso de un ácido tan fuerte como el ácido sulfúrico, el equipo de trabajo debe tener una alta resistencia a la corrosión. También es necesario tener recubrimientos epóxicos ya que estos aumentan la resistencia a la corrosión. Estas medidas deben tomarse si el equipo y los materiales de construcción están en contacto directo o indirecto con el ácido, ya que los gases que se generan por la exposición al sol también son corrosivos.

### B. Materiales

En el método de lixiviación para la extracción de Cobre son necesarios muchos equipos y materiales. Donde el material de fabricación predominante es acero inoxidable 316 y 316L. Los

equipos críticos para este proceso son los equipos de bombeo, debido a que son aquellos que tienen contacto directo con el ácido sulfúrico. Estos deben ser fabricados en su mayoría de acero inoxidable 316. En algunos casos estos equipos son tratados con recubrimientos epóxicos, de manera que se faciliten las tareas de mantenimiento. Porque de esta manera es posible identificar si hay fugas en la carcasa de las bombas. Este tipo de acero inoxidable tiene la característica de estar expuesto al ácido sulfúrico en concentraciones inferiores al 20% y superiores al 80%. Este es un acero austenítico tipo 16-10[2].

TABLA I. Clasificaciones del acero inoxidable

Estándar	Material
AISI, ASTM, NMX	316 / 316L
UNS	S31600 / S31603

### C. Equipos y características

En el caso de equipos sumergibles para sistemas de detección de fugas, estos sistemas son esenciales en esta aplicación debido a que la filtración de ácido sulfúrico debe evitarse, para impedir la contaminación del subsuelo y los mantos acuíferos que pueden estar cerca de los repesos.

La construcción de sistemas de detección de fugas se realiza al mismo tiempo que la presa. Un diseño ya probado, es colocar tuberías de polietileno de alta densidad (*HDPE*) de al menos 12" en las laderas del repeso. Esto antes de colocar las capas finales del recubrimiento de geomembrana (*Liner*) que cubrirá todo el repeso.

Las tuberías de *HDPE* deben ir desde la parte superior de la pendiente de la presa, hasta las cámaras del sistema de detección de fugas, estos pozos de succión se colocan en las partes inferiores de la presa, esto en orden que, si hay una fuga, esta configuración ayuda a que se pueda concentrar la fuga en estas áreas, de esta manera todo el producto que se logre filtrar permanecerá de las capas finales del *Liner*.

En el caso concreto de las bombas *Warson* de acero inoxidable sumergible de 10 *LPS*, modelo 6WL-1C/2 pasos de la Fig. 1, están fabricadas en fundición de acero inoxidable 316, esto para cubrir la necesidad de un material que es capaz de resistir el ambiente corrosivo y cumple con las características mecánicas que son necesarias para funcionar correctamente [3].

TABLA II. Elementos de la bomba *Warson* 6WL-1C/2 pasos

Clave	Descripción	Material
101	Tazón de descarga	S.S. 316
102	Tazón	S.S. 316
103	Impulsor	S.S. 316
104	Buje	Vesconite
105	Buje cónico	S.S. 316
106	Flecha de la bomba	S.S. 316
107	Adaptador de succión	S.S. 316
108	Cople bomba-motor	S.S. 316
109	Tornillo de acople	S.S. 316
110	Tornillo de tazón	S.S. 316
111	Colador	S.S. 316

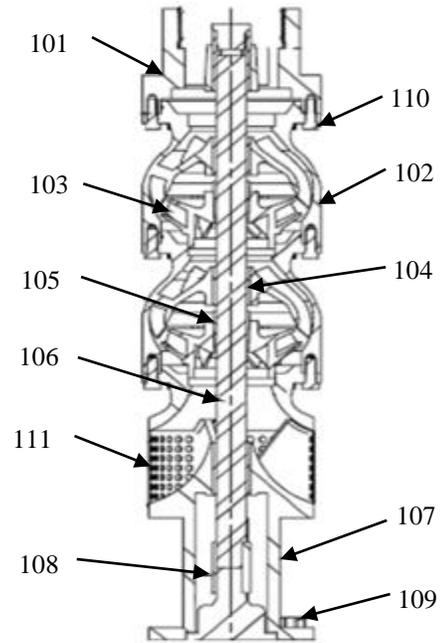


Fig 1. Bomba sumergible *Warson* de 10 *LPS*

El motor que impulsa este tipo de bombas debe ser completamente sellado y sumergible. Al igual que la bomba, los materiales de fabricación del motor deben ser de acero inoxidable. Los rodamientos de los ejes y los empaques pueden ser de cerámica en el caso de la bomba y polímeros en el caso del motor. Ambos deben tener la capacidad de resistir el ácido sulfúrico. En este caso, el motor *Hitachi* de 7,5 CV, 230 V, 60 Hz, 3 Ph, S.F. 1,15 de la Fig. 2, puede funcionar en este tipo de entorno sin reducir su capacidad [4].

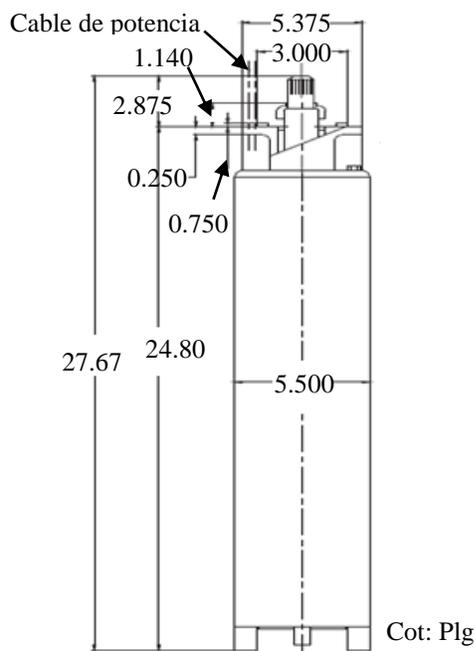


Fig 2. Dimensiones del motor *HITACHI*

#### D. Instalación

Una vez que se cubre la necesidad de materiales de los equipos para operar en estas condiciones, es necesario seguir las instrucciones de mantenimiento de los proveedores. Para un correcto funcionamiento y mantener la garantía del equipo que ha sido suministrado.

Cuando se trabaja en ambientes tan corrosivos como en este caso, se debe prestar especial atención a los elementos que pueden presentar más fricción. En el caso de la bomba, los impulsores, las placas y la flecha deben ser atendidos. En el caso de los motores, la principal preocupación es mantener la hermeticidad de este, ya que, si es dañada la carcasa, el ácido puede penetrar e inundar el motor, que inmediatamente causa la falla del motor.

Las indicaciones del proveedor para instalar las bombas sumergibles de *Warson* son [3]:

- Disponer de equipo de seguridad para instalar el equipo. (Guantes de servicio pesado, lentes de protección industrial y ropa adecuada para el trabajo).
- Herramienta adecuada para el montaje de la bomba. (Llaves de cadena, llaves Stillson, cortadoras o sierra de sierra, archivos, cepillo de alambre, pinzas de

cortes para alambres y llaves españolas, arandelas o *sockets*).

- Materiales como: sellador de roscas, aceite lubricante, grasa, aceite para impulsores, solvente (cualquier solvente de petróleo) y cemento.
- No golpear la flecha de la bomba cuando se esté manipulando.
- Utilizar los materiales para preparar el acoplamiento de la bomba-motor.

Las principales indicaciones del proveedor para instalar el motor sumergible *Hitachi* son [4]:

- No tirar del cable de conexión del motor y no utilizarlo para cargar el equipo.
- El motor contiene agua con anticongelante, antes de instalarlo, este debe ser reemplazado con agua limpia y asegurarse de que los tapones de llenado y drenaje están completamente sellados.
- No golpear la flecha, ya que esto puede causar daños a los rodamientos.
- Comprobar la rotación del motor.
- Si el motor se va a colocar en una posición horizontal, se recomienda que el cable del motor este orientado hacia arriba, esto si se está mirando el motor en frente.
- Compruebe la rotación del motor antes de acoplarlo con la bomba.

Al ser un equipo que estará total o parcialmente sumergido, debe usar una chaqueta de enfriamiento de *PVC* (que también es resistente al ácido sulfúrico), lo que le permitirá estar en una temperatura ideal de trabajo y así evitar el sobrecalentamiento del motor.

Otro componente necesario para esta aplicación es un soporte con rodamientos que permita mover la bomba-motor dentro de la tubería de *HDPE* Fig. 3. Esto es debido a la instalación se lleva a cabo en un ambiente confinado y es prácticamente imposible que el personal pueda verificar la posición final del arreglo. Con este soporte, la posición correcta del equipo está garantizada.

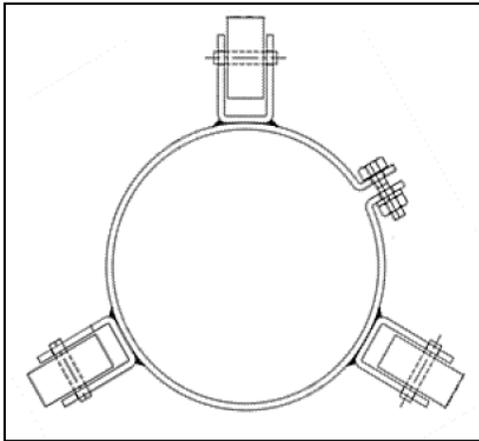


Fig 3. Soporte con rodamientos

### E. Operación

Las recomendaciones para el funcionamiento de estos equipos se determinan en base, a lo que se establece en los manuales de los equipos, que son suministrados por los proveedores. Las principales recomendaciones son [4]:

- Nunca arrancar el motor en seco.
- No realizar más de cuatro arranques del equipo en un período igual o inferior a 1 hora, esto es para no quemar el motor debido al uso excesivo del arrancador.
- Hacer una prueba en el pozo de bombeo donde se colocarán estos equipos, una vez al mes, en caso de que no haya fugas en este período, esto para evitar que el equipo se atasque por falta de operación.
- Comprobar los valores de la tensión de entrada al motor, para evitar que se dañe por el exceso de tensión, con estos datos también se puede determinar el rendimiento y la condición de los equipos.

### F. Mantenimiento

Al ser equipos con mayor resistencia mecánica, dadas las características de sus materiales de fabricación, al igual que las del acero inoxidable 316. El mantenimiento de estos equipos es más sencillo, esto se debe a que el equipo está diseñado para un uso intensivo. Además, estos equipos se instalan en áreas confinadas, lo que complica el acceso a ellos para hacer que el mantenimiento sea más constante.

Entre las recomendaciones de los fabricantes de la bomba y el motor, son [4]:

- Compruebe que las conexiones del motor son adecuadas y compruebe que hay corriente en las líneas que van al motor.
- Colocar una cuerda de seguridad para poder retirar la bomba de su confinamiento, a fin de no sobrecargar el cable de conexión del motor, en caso de que sea necesario retirar el equipo.

El mantenimiento importante de estos equipos se produce en tres circunstancias [4]:

1ª- Una vez que 9,000 horas de operación se han completado o 2 años desde la instalación, es aconsejable desinstalar completamente este equipo para cambiar las piezas si es necesario.

2ª- Si el equipo funciona con líquidos agresivos (corrosivos y/o sólidos en suspensión), se recomienda desinstalar el equipo una vez al año para una inspección y cambio de piezas de repuesto si es necesario.

3ª.- Cuando se produce una disminución en el rendimiento del equipo durante su funcionamiento, esto se identifica cuando el caudal de la bomba disminuye y el equipo continúa en funcionamiento.

### 3. Conclusiones

Los equipos diseñados para ambientes altamente corrosivos son adecuados para funcionar bajo circunstancias adversas. El equipamiento construido en acero inoxidable tiene una mayor durabilidad y estos pueden funcionar durante varias horas continuas, sin presentar fallas o deterioro en sus componentes principales. Aunque en las pruebas iniciales estos equipos presentaron problemas, se comprobó después de las inspecciones apropiadas, que los problemas presentados en los equipos se debían a la falta de personal calificado para manejar estos equipos. Es posible garantizar el correcto funcionamiento de los equipos fabricados en acero inoxidable en ambientes corrosivos, si cumplen con las indicaciones de los proveedores.

### 4. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México por el apoyo brindado.

## 5. Referencias

- [1] F. J. Alguacil, *La Recuperación de Cobre Mediante Lixiviación-Extracción con Disolventes-Electrólisis: Hacia el Siglo XXI*, Ed. Revista de Metalurgia Vol. 34, pp 499-506, 1998.
- [2] Gamboa-Poveda E, Alvarez-Martínez R, *Acero Inoxidable 316 y 316 l Propiedades y Características Físico-Químicas*, Ed. Fundación Universitaria los Libertadores, pp 10-24, 2012.
- [3] Warson pumps, *Manual de Montaje, Servicio y Mantenimiento de Bombas Sumergibles*, Ed. Warson pumps, pp 1-3, 2010.
- [4] Hitachi, *Motores Sumergibles Hitachi*, Ed. Hitachi, pp 1-4, 2007.

## 6. Biografías

Arturo Torres Yáñez: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán del IPN, 3 años de experiencia laboral, 1 año en Inbursa en proyectos de mantenimiento y 2 años en ICA Fluor en desarrollo de ingeniería básica y de detalle.

Mijaíl Adalid Rivera Hernández: Ingeniero Mecatrónico egresado de la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN, 3 años de experiencia laboral en *Ford Motor Company*.

Salvador Cruz López: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán del IPN.

Juan Alejandro Vázquez Feijoo: Ingeniero Mecánico egresado de la Universidad Autónoma de México, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) del IPN y PhD (Doctorado en Philosophy) en The University of Sheffield en el Reino Unido.

Guillermo Urriolagoitia Sosa: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco del IPN, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en 2 programas de posgrado, uno de ellos en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) del IPN y la otra Maestría en Ciencias en el Reino Unido en la Oxford University y PhD (Doctorado en Philosophy) en Oxford Brookes University en el Reino Unido.

Emmanuel Alejandro Merchán Cruz: Ingeniero en Robótica Industrial egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco del IPN, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en el programa de posgrado de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) y PhD (Doctorado en Philosophy) en The University of Sheffield en el Reino Unido.

Guillermo Manuel Urriolagoitia Calderón: Ingeniero Mecánico egresada de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica el IPN, Diplomado en Especialización docente en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN, Maestría en Ciencias en Ingeniería mecánica por el Imperial College of Science and Technology en Glasgow Escocia, y PhD (Doctorado en Philosophy) por la Universidad de Londres en Inglaterra.

# Predicción de fallas en redes de telecomunicaciones usando métodos de inteligencia artificial

F. Tapia<sup>1,a</sup>, H. Carrillo<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias y Centro de Ciencias de la Complejidad, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>a</sup>fernando.tapia.salinas@gmail.com, <sup>b</sup>hcarrillocalvet@gmail.com

**Resumen**—Presentamos un método para la aplicación de redes neuronales (perceptrones multicapa), para la predicción en línea, de fallas en una red de telecomunicaciones 4G-LTE. La capacidad predictiva de la red neuronal se logra mediante un entrenamiento basado en el análisis de secuencias de eventos previamente observados en la red de telecomunicaciones. Al predecir fallas de un elemento de red se puede evitar el impacto potencial en los servicios de voz y datos brindados por el operador de telecomunicaciones en el caso de que llegara a ocurrir tal evento de falla. Para probar la utilidad de nuestra metodología, usamos un conjunto de datos de alarmas de la industria de telecomunicaciones que incluye componentes de la red de voz, datos y acceso de radio. Los resultados obtenidos de nuestros experimentos de laboratorio demuestran que este método de predicción puede ser usado para predecir la ocurrencia de fallas en elementos de red 4G-LTE con un buen rendimiento.

**Palabras clave.** Red neuronal, perceptrón multicapa, predicción alarmas, aprendizaje automático, inteligencia artificial, red telecomunicaciones 4G LTE.

## 1. Introducción

Los operadores de las redes de telecomunicaciones modernas (4G, LTE) producen diariamente una gran cantidad de datos que contiene información valiosa sobre la dinámica del comportamiento del sistema global que sirve como elemento generador de los servicios de voz y datos, esta información se genera en forma de notificaciones de eventos de alarmas, o indicadores de rendimiento de la red. Para mejorar la confiabilidad y las disponibilidades de la red de telecomunicaciones es muy útil realizar procesos de automatización proactivos que reduzcan el periodo de tiempo para corregir las anomalías que ocurren en la red. Esta colección de datos regularmente esconde conocimiento e inteligencia que es crucial para algunas tareas involucradas en la administración de una red de telecomunicaciones [1]. Las redes de telecomunicaciones generan grandes cantidades de información y son candidatas para la aplicación de técnicas de inteligencia analítica [2]. Las técnicas de minería de datos son muy adecuadas para aplicarse en las redes de telecomunicaciones [5] (voz y datos) para:

1. Apoyar a sistemas de soporte de la red para que permitan una eficiente planeación de la capacidad y mejora en la disponibilidad de la red.

2. Obtener conocimiento a través de la explotación automática de los grandes volúmenes de datos que tiene disponibles una red de telecomunicaciones.

3. Proveer de manera automatizada conocimiento para que los expertos en el dominio de las telecomunicaciones lo usen de una manera secundaria de validación o como fuente

primaria de solución de los problemas usando el conocimiento extraído de los patrones de datos.

Nuestro objetivo en este trabajo es predecir fallas potenciales de una red de telecomunicaciones evitando con ello el posible impacto en el servicio de la red en el caso de que llegara a ocurrir dicha falla. Diversas técnicas y métodos han sido usados para predecir fallas (redes bayesianas, series de tiempo, árboles de decisión, etc.) [9].

En este trabajo presentamos un método basado en redes neuronales para la detección de fallas. La red neuronal se entrena utilizando las alarmas que provienen directamente de los dispositivos de una red de telecomunicaciones, logrando predecir correctamente alarmas en los nodos de servicio con una precisión que llega a alcanzar hasta el 94.84% de precisión.

## 2. Elementos involucrados en el problema de predicción de fallas en la red de telecomunicaciones.

El problema de nuestro interés involucra los siguientes elementos:

- Red de telecomunicaciones 4G LTE (Long Term Evolution),
- El sistema de administración de la red que permite detectar, identificar, concentrar y registrar los mensajes emitidos por algún elemento de la red LTE,
- Las alarmas y los eventos de falla de un elemento de red que son alimentados al sistema de gestión. A partir de ello mostramos el esquema de modelación de una base de datos de alarmas, dirigido a poder realizar el proceso de predicción.

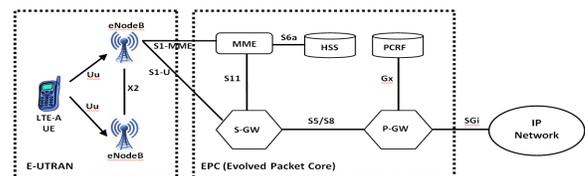


Fig 1 Arquitectura de red de telecomunicaciones LTE

### A. Componentes de una red de telecomunicaciones 4G LTE (Long Term Evolution)

Los componentes de una red LTE, de acuerdo [3] son los siguientes:

### 1. Red de acceso de radio para LTE

La red de acceso de radio se utiliza para la conexión de radio inalámbrica entre los teléfonos móviles y las antenas del operador móvil. La red de acceso de radio también se denomina red de acceso de radio terrestre del sistema universal de telecomunicaciones móviles evolucionado EUTRAN o Evolved EUTRAN también puede denominarse LTE (Long Term Evolution).

### 2. La red central (Core Network)

La red central (core network) es el cerebro del sistema. Está formado por conmutadores de telefonía que habilitan los diferentes servicios para los usuarios móviles. Los dispositivos de la red central conectan los dispositivos móviles en la red móvil y también conectan la red móvil con la red de telefonía fija e internet. La red central de LTE se llama EPC (Evolved Packet Core). Figura 1 se ven estos componentes.

Todos los componentes de la red separadamente y también integrados de manera dependiente en un servicio específico son susceptibles de generar alarmas indicando algún tipo de situaciones anormales que ocurren en algún elemento de la red de LTE.

#### B. Administración de fallas de una red de telecomunicaciones

En una red de telecomunicaciones se generan los mensajes de que han ocurrido algún evento anormal en la red, esto sucede con una temporalidad muy cercana al tiempo real. Los mensajes de alarmas se codifican en diferentes protocolos, que pueden ser ASCII, TL1, Q3, CORBA, XML, JSON, etcétera, estos protocolos de entrega y recepción de alarmas depende de los proveedores de la tecnología de equipos de red. En este trabajo recogemos los mensajes en una base de datos en texto crudo, como se muestra en la figura 2.

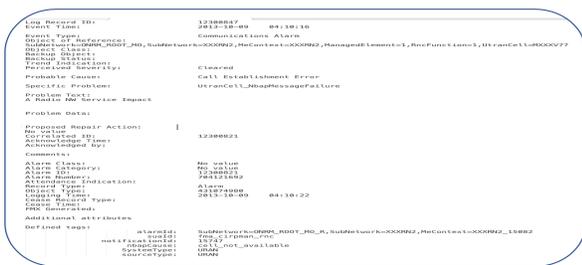


Fig 2. . Alarma en texto desde la fuente del Element Manager

Estos mensajes indican el estado operativo de la red y se les conoce como eventos. Algunos de estos eventos pueden ser alarmas que reportan advertencias con respecto al funcionamiento de la red, o bien pueden estar reportando fallas de los componentes. Estos eventos son capturados por un sistema de gestión de red denominado Operations Support Systems o sistemas de soporte a las operaciones (OSS por sus siglas en inglés). Cuando la red es muy grande, puede haber

varios sistemas de OSS, cada uno tiene la responsabilidad de gestionar la respectiva subred que pertenece a la red LTE, por ejemplo la red de IP, o de transporte que a su vez pueden ser gestionados por un Manager of Managers o gestor de gestores (MoM por sus siglas en inglés). Esta jerarquía en la captura de eventos permite que las fallas puedan ser escaladas y tratadas según la complejidad relacionada a la corrección de la falla. En la figura 3, se muestra el modelo de gestión, el cual funciona paralelo a los sistemas de gestión (EM) que sirven para poder identificar, generar, y controlar las fallas.



Fig 3. Modelo de Gestión de una red de telecomunicaciones

### 3. Formulación del problema de predicción.

#### A. Eventos, alarmas y ventanas

Existen diferentes clasificaciones de patrones de eventos, técnicas y escenarios de aplicación [4]. En este trabajo usaremos el enfoque de patrones de eventos [8] y describiremos de manera general algunos conceptos y técnicas relativos a esta clase de información temporal que relacionaremos con las redes neuronales a efectos de modelar eventos de alarmas y predecir la ocurrencia de falla en algún nodo de servicio de la red 4G-LTE.

El registro de alarmas o eventos en el tiempo lo llamaremos *secuencia de eventos*. Esta secuencia describe el comportamiento de una red de telecomunicaciones pero puede también describir cualquier serie de registros que ocurren en el tiempo. Un ejemplo genérico de una secuencia de eventos podría ser el mostrado en la figura 4, donde la primera letra representa el tipo de evento y el segundo número el registro temporal de ocurrencia del evento:

$$\{(D, 10), (C, 20), (A, 30), (B, 40), (D, 50), (B, 60), (A, 80), (B, 90), (D, 100), (A, 110), (B, 120), (D, 130), (A, 140)\}$$

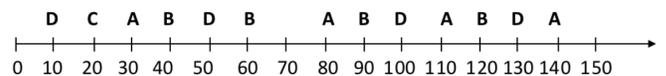


Fig 4. Secuencia de tiempo

De esa manera se modela una alarma, mediante pareja  $A = (E, t)$  donde  $E$  es la etiqueta de la alarma y  $t$  el momento en que se presentó dicha alarma. En el ejemplo que se muestra en la figura 5, a simple vista se puede decir que se detecta un patrón: a la ocurrencia del evento (alarma) B, casi siempre le precede la ocurrencia del evento A (exactamente en ese orden).

La distancia (número de eventos que hay entre ellos) entre la ocurrencia de ambos eventos tampoco parece ser considerable. Esta relación de ordenamiento temporal de eventos es lo que reconocemos como un *patrón o episodio*. Otro concepto que introducimos para modelar nuestro problema de predicción es el de *ventana*, este es un intervalo o pedazo de la secuencia original de la cual podemos especificar el tiempo en que empieza y el tiempo en que termina. La diferencia entre ambos tiempos es la *longitud* o tamaño de la ventana.

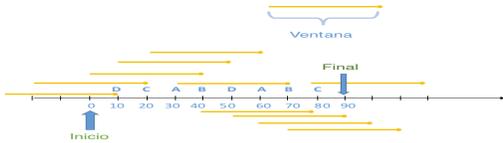


Fig 5. Ventanas de una secuencia de alarmas

En el la figura 5 a manera de ejemplo se muestra una secuencia de eventos que empieza en 0 y termina en 90. Además, se muestran todas las ventanas de tamaño 40 (es decir, la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial es de cuarenta unidades) que se pueden formar en esa secuencia de eventos.

B. Episodios, Reglas de Asociación

Para representar episodios usamos una gráfica dirigida. Una definición formal de gráfica se ofrece en [10]. Para nuestros fines es suficiente un esquema para entender mejor la idea que subyace detrás de de la gráfica

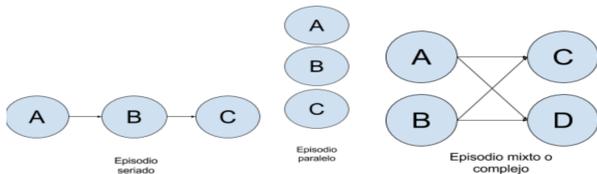


Fig 6. Ejemplo de una gráfica de episodios

En la figura 6 podemos ver esquemáticamente que, en el *episodio seriado*, se tiene un orden secuencial estricto entre sus nodos, en el *episodio paralelo* no pone restricciones en la ocurrencia de los eventos que se representan en los nodos, y el episodio *complejo o mixto* ocurre si A y B preceden a C y D, pero no se especifica el orden de aparición de A y B, tampoco el orden entre C y D. Definiciones formales de *episodio seriado*, *episodio paralelo* y *complejo o mixto* pueden consultarse en [8].

Una regla de asociación es una expresión que indica una relación entre dos episodios, digamos  $\alpha, \beta$ .

La regla de asociación en este caso se denota como  $\alpha \dashv\vdash \beta$ .

Es necesario especificar a qué llamaremos un *episodio frecuente* en la secuencia de eventos. Una manera de abordar esa definición sería fijar un tamaño de ventana para

posteriormente desplazar o mover esa ventana a lo largo de la secuencia original. De todas las posibles ventanas que se pueden obtener, contaremos aquellas ventanas en las que el episodio sucedió. La cantidad de ventanas de tamaño  $N$  en la que ocurrió un episodio dividida entre la cantidad total de ventanas de tamaño  $N$  que se pueden formar en la secuencia de eventos original, nos proporciona un número entre 0 y 1 que nos indica su frecuencia de ocurrencia relativa.

3. Predicción de alarmas usando redes neuronales

A. Modelado de datos de entrada en la red neuronal

El vector de que usaremos como entrada a la red neuronal es el vector correspondiente a cada ventana: la  $i$ -ésima componente del vector corresponde al  $i$ -ésimo evento de una ventana, se reserva el número  $0 \in N$  para representar la ausencia de alarmas en una posición de la ventana. Por ejemplo la representación  $(3,1,0,8,0,0,2)$  significa que se recibió la alarma 3 en la posición 1 de la ventana, la alarma 1 en la posición 2 de la ventana, ninguna alarma en la posición 3 de la ventana, etc..

B. Modelado de datos de salida de la red neuronal

En nuestro modelo la salida de la red neuronal es el vector  $Y \in \mathbb{R}^k$  de probabilidades de ocurrencia de cada uno de los  $k$  eventos que pueden ocurrir en la red de telecomunicaciones. Así,  $\forall i \in \{1 \dots k\}$  se tiene que  $y_i \in [0,1]$  representa la probabilidad de la ocurrencia del  $i$ -ésimo evento dentro de un lapso temporal previamente especificado. Un ejemplo de salida podría ser  $(0.002, 0.3, \dots, 0)$ , donde cada entrada del vector es la probabilidad de que suceda una alarma en  $n$  unidades de tiempo después de la ocurrencia de la última alarma de la ventana. La entrada de valor más alto de este vector nos indicaría la alarma más probable. En nuestro caso usaremos un vector de 7 entradas como salida. Eso implica que utilizaremos 7 neuronas en la capa de salida del perceptrón. En lugar de la clásica función sigmoideal, como función de activación de cada neurona de la capa de salida, utilizamos la función *Softmax*:

$$a_j^L = \frac{e^{z_j^L}}{\sum_k e^{z_k^L}} \tag{1}$$

$$\text{Donde } z_j^L = \sum_k [w_{jk}^L a_k^{L-1} + b_j^L]$$

es la entrada ponderada que entra a la neurona de la capa de salida con índice  $j$ . La suma del denominador en la ecuación (1) se mueve sobre todas las neuronas de la capa de salida. La primer propiedad de está función es que la suma de las salidas de la capa de salida es 1, y entonces el vector de salida podría ser considerado como una especie de vector de probabilidad. Es decir, siendo  $L$  la capa de salida de la red, se cumple que:

$$\sum_j a_j^L = \frac{\sum_j e^{z_j^L}}{\sum_k e^{z_k^L}} = 1 \tag{2}$$

Al usar la función Softmax nos ayuda a que la salida sea la alarma que es más probable que ocurra. La función de error cuadrático medio (MSE) no necesariamente presenta esa propiedad.

### C. Matriz de entrenamiento

Para someter a la red neuronal a un proceso de aprendizaje supervisado necesitamos un conjunto grande de parejas de vectores (definieron en las secciones previas (a) y (b)): uno de entrada y otro que representa la salida deseada. Para generar el conjunto de entrenamiento, debemos deslizar la ventana a lo largo de la secuencia. El tamaño del paso puede producir diferentes conjuntos. En este trabajo el paso de la ventana fue de tamaño uno. Como vector de entrada usaremos el enfoque mencionado en (a), fijando el tamaño de ventana en  $n$ . Para ello crearemos ventanas sobre la lista de alarmas a semejanza de lo que vemos en la figura 8 y las guardamos como un vector de dimensión  $n$ . Dada una ventana (de tamaño  $n$ ), nuestro objetivo será predecir la alarma que se encuentra en la posición  $n$  a partir de las  $n - 1$  alarmas anteriores que se observaron. Nuestra red recibirá un vector de dimensión  $n - 1$  y nuestra primer ventana empezará desde la primera alarma y termina en la alarma que se encuentra en la posición  $n$ -ésima. Si el tamaño de ventana es  $n$  y como nuestra lista consta de 287,256 alarmas, tendremos en total un total de  $287,256 - n$  ventanas. Por último, la matriz de entrenamiento tendrá como renglón  $i$ -ésimo la ventana que empieza en la alarma  $i$ -ésima Estructura y entrenamiento de la red neuronal

Para diseñar la arquitectura de la red neuronal se realizaron experimentos exploratorios. Se observó que al agregar más capas ocultas a la red, no se obtenían mejoras sustanciales respecto al perceptrón con una capa oculta. Se decidió usar una capa de entrada cuyo número de neuronas coincide con el tamaño de la ventana que deseamos utilizar (tamaño  $n$ ). Cada una de estas neuronas posee una función de activación conocida como ReLU cuya definición es:

$$f(x) = x^+ = \max(0, x) \quad (3)$$

Finalmente, la red tendrá una capa de salida con siete neuronas (las cuales coinciden con el número de alarmas posibles en la secuencia). En cada una de estas neuronas se utiliza la función Softmax como función de activación, definida para la  $j$ -ésima neurona de la capa de salida (denotada por  $L$ ) como:

$$a_j^L = \frac{e^{z_j^L}}{\sum_{k=1}^7 e^{z_k^L}} \quad k \in \{1, 2, \dots, 7\} \quad (4)$$

La estructura de la red neuronal se resume en la tabla.

TABLA I. ESTRUCTURA Y ENTRENAMIENTO DE LA RED NEURONAL

Parametro	Establecimiento
Capas ocultas	1

Neuronas en la capa oculta	15
Factor de aprendizaje de	0.01
Función de activación de las neuronas de la primera capa	ReLU
Función de activación de las neuronas de la capa de salida	Softmax
Función error o costo utilizada	Función de entropía cruzada
Algoritmo utilizado para el aprendizaje	Retropropagación (usando método del descenso del gradiente)
Tamaño del mini-batch	30
Cantidad de datos usados para prueba	20% de los datos totales
Cantidad de datos usados para validación	20% de los datos totales

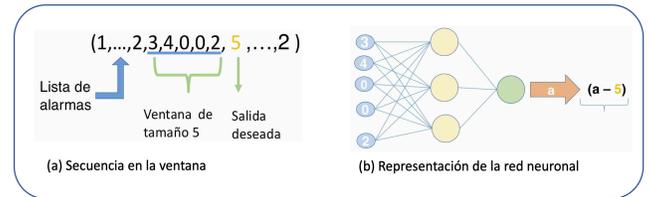


Fig 7. Representación de la red neuronal para una secuencia

### D. Escenario de experimentacion

Para tener mayor flexibilidad, los datos recolectados se almacenaron en una base de datos NoSQL que constaba originalmente con 256 columnas, después de un proceso de limpieza genérico, la tabla final quedó con 42 campos, 20 de ellos de la fuente original, y 18 campos de apoyo para alimentar a la red neuronal. En algunos campos de texto como los mostrados en la tabla II se les aplicaron transformaciones de hashing (MD5), soundex en otros campos importantes para el proceso de predicción y en dos campos se realizó una codificación numérica lineal.

TABLA II. TRANSFORMACION DE LOS CAMPOS PARA ENTRADA A LA RED NEURONAL

Campo	Mapeo
EventType	MD5, Soundex
SpecificProblem	MD5, Soundex
PerceivedSeverity	MD5, Soundex
AlarmCategory	MD5, Soundex
ManagedElement	Soundex, Mapeo numerico lineal
SubnetworkNode	Soundex, Mapeo numerico lineal

En este experimento, después de la limpieza, la base de datos contiene un vector  $A$  que representa una secuencia de 287,256 elementos:

$$A = \{x_1, \dots, x_n\}, n = 287,256.$$

Esa secuencia se construyó para alimentar la red neuronal para predecir las ocurrencias de alarmas en los nodos de servicio.

La figura 8 muestra la distribución de frecuencias de las alarmas en la base de datos.

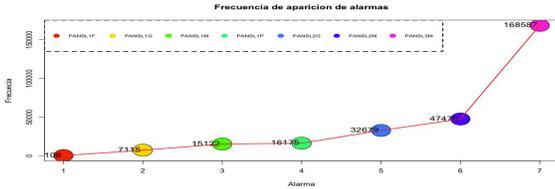


Fig 8. Distribución de alarmas

### E. Resultados principales

Utilizamos una red que es entrenada a lo largo de 30 épocas (epochs) y un tamaño de ventana 5. Usamos como ejemplos de entrenamiento el 80% de las ventanas. El 20% restante es usado para evaluar nuestro modelo (ejemplos de prueba). En el 80% de los ejemplos usados para entrenamiento de la red, se utiliza un 20% de estos datos para usarlos como ejemplos de validación. Utilizamos un criterio de paro en el entrenamiento de la red; el criterio consiste en detener el entrenamiento si no se logra disminuir, de manera considerable, el valor de la función costo o error en los datos de validación, al final de cada época. Si denotamos por  $E_t$  el valor de la función costo en los ejemplos de validación en la época  $t$ , diremos que el entrenamiento en una época  $n$  no mejoró si  $E_n < E_{n-1} - \epsilon$ ,  $\epsilon = 0.00001$ . Se permiten 3 épocas consecutivas en las que suceda esto antes de detener el entrenamiento. Obtenemos la gráfica mostrada en la figura 10.

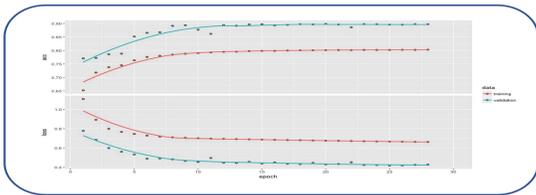


Fig 9. Entrenamiento con 30 épocas y un tamaño de ventana de 5

La matriz de dispersión que se muestra en 5.4.

		ventanas.testtarget						
classes		0	1	2	3	4	5	6
1	1	31	24	28	10	30		
2	2	6	43155	178	1152	1990		
3	3	13	153	2530	59	162		
4	4	0	0	1	3	1		
5	5	1	188	28	2651	109		
6	6	12	765	164	793	3213		

Fig 10. Matriz de dispersión. Se ha desplazado un dígito (0-1, 1-2, etc). Los reglones son la alarma real. Las columnas alarma que se predijo

Para los datos de prueba se obtiene un error de 0.4701603 y un porcentaje de alarmas predichas correctamente de 89.72%

(porcentaje de precisión). La matriz de dispersión nos muestra que la precisión alcanzada en la alarma 0 es muy baja. Además notamos que algunas alarmas no fueron consideradas como respuesta de la red neuronal, tal es el caso de la alarma 1 y 4 (no aparecen como nombre de una columna) que representan el 20% de ventanas. En la figura 5.5, se observa la alta desigualdad en la distribución de las alarmas. Ante esta situación podríamos optar por seleccionar los datos de prueba (y por ende los de entrenamiento)

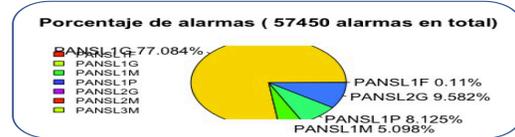


Fig 11. Porcentaje de las alarmas deseadas como salida de las ventanas del conjunto de prueba. Algunas alarmas no aparecen.

### F. Experimentos

1. En este experimento tomamos 20% de las ventanas aleatoriamente para prueba. Esto aumentaría la posibilidad de representación de las alarmas que se presentan con menos frecuencia. El resultado de entrenar bajo este muestreo de ventanas se muestra en la figura 14.

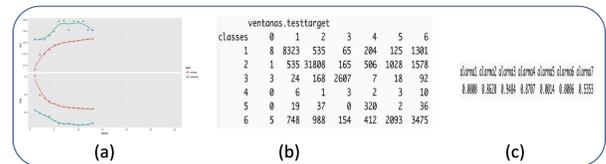


Fig 12. Experimento 1. Entrenamiento (a) Matriz de Dispersión (b) Resultados de Predicción (c)

En este caso para los datos de prueba se obtuvo un error de 0.6129664 y un porcentaje de precisión de 80.49%. En este caso los resultados se muestran en la tabla II.

TABLA II. PORCENTAJE DE ALARMAS PREDICHAS CORRECTAMENTE POR LA RED

Campo	% PREDICCIÓN CORRECTA
ALARMA1	0
ALARMA2	86.20
ALARMA3	94.84
ALARMA4	87.07
ALARMA5	1.4
ALARMA6	0.06
ALARMA7	53.53

### G. Comparación con otros clasificadores

Se realizó la comparación del desempeño de la red neuronal, con otros modelos de predicción. Los resultados se muestran

en la figura 15.

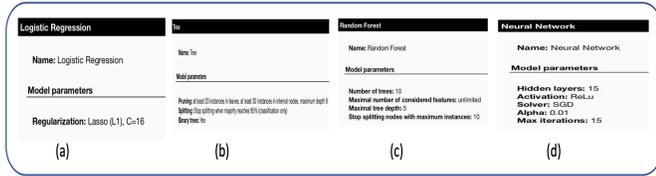


Fig 13. Modelos utilizados para efectos de comparación. Regresión logística (a) Árbol de decisión (b) Bosque aleatorio (c) Neural Network (d)

Las técnicas que usaron para comparar fueron árboles de decisión, bosque aleatorio (random forest), y naive bayes sin parámetros. No se hizo un análisis exhaustivo sobre los parámetros de los otros modelos ni un tratamiento especial en el momento de introducir los datos.

Los resultados de la comparación entre modelo se muestra en la figura 16. En la primera comparación el árbol de decisión tiene un mejor precisión que la red neuronal, sin embargo, modificando a la red neuronal con nuevos parámetros con 2 capas ocultas de tamaño 1,000 y 10 respectivamente, el número de épocas se establece en 30, los resultados mejoran de tal manera que la red neuronal se comporta mejor que las otras técnicas.

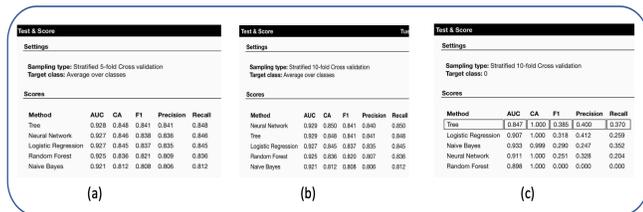


Fig 14. Comparación del performance de la predicción contra otros modelos

#### 4. Conclusiones

En este artículo hemos propuesto la aplicación de redes neuronales de retro-propagación multicapa aplicado a un conjunto de datos de alarmas de una red de telecomunicaciones. El objetivo fue aplicar la red neuronal para lograr predicción de alarmas en los nodos de la red LTE. Los resultados que se obtuvieron fueron muy buenos en uno de los casos experimentados se logró una predicción correcta del 89.72% y algunos casos del 94.84% lo cual es una muestra que el uso de redes neuronales para predecir alarmas es muy benéfico y es susceptible de lograr anticiparse a la ocurrencia de fallas en una red de telecomunicaciones 4G-LTE.

#### 5. Referencias

[1] G. M. Weiss, “Data Mining in the Telecommunications Industry,” Data Min. Knowl. Discov. Handb., pp. 1189–1201, 2005.  
 [2] V. Kotu and B. Deshpande, Predictive Analytics and Data Mining. 2015.  
 [3] K. Hatonen, M. Klemettinen, H. Mannila, P. Ronkainen, and H. Toivonen, “Knowledge discovery from telecommunication network alarm databases,” Proceedings of the Twelfth International Conference on Data Engineering, no. March. 1996.

[4] X. X. Zhu, G.-Q. Wu, and W. Ding, “Data Mining with Big Data,” Knowl. Data Eng. IEEE Trans., vol. 26, no. 1, pp. 97–107, 2014.  
 [5] R., “Big Data a sure thing for telecommunications: Telecom’s future in Big Data,” in Proceedings - 2013 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery, CyberC 2013, 2013, pp. 148–154.  
 [6] U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and P. Smyth, “The KDD process for extracting useful knowledge from volumes of data,” Commun. ACM, vol. 39, no. 11, pp. 27–34, 1996.  
 [7] R. K. S. and R. Singh, “4G LTE Cellular Technology: Network Architecture and Mobile Standards,” Int. J. Emerg. Res. Manag. Technol., 2016.  
 [8] H. Mannila, H. Toivonen, and I. Verkamo, “Discovery of frequent episodes in event sequences,” Data Min. Knowl. Discov., 1997.  
 [9] F. Salfner, M. Lenk, and M. Malek, “A survey of online failure prediction methods,” ACM Comput. Surv., 2010.  
 [10] P. Diaconis and B. Bollobas, “Modern Graph Theory,” J. Am. Stat. Assoc., 2006.

#### 6. Biografías

**Fernando Tapia**, Realizó la carrera de Matemáticas en la Facultad de Ciencias de la UNAM, 1998. Obtuvo la Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Ciencias de la Computación en el departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, 1999. Actualmente realiza estudios de Doctorado en Ciencias de Datos en el Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación (INFOTEC), en donde esta trabajando en investigar métodos de aprendizaje automático y modelos predictivos de inteligencia artificial aplicados a la predicción en redes de datos y telecomunicaciones. Desde 1998 ha colaborado en la industria de telecomunicaciones en diversos proyectos de administración de infraestructura de redes en operadores fijos y móviles en México y Latinoamérica.

**Humberto Carrillo**, Profesor Titular de Tiempo Completo de Matemáticas en la Facultad de Ciencias desde 1975, Investigador Nacional nivel II. Obtuvo el grado de maestro y doctor en Matemáticas en la Facultad de Ciencias, UNAM. Realizó una estancia posdoctoral en Lefschetz Center for Dynamical Systems, Division of Applied Mathematics, Brown University. Ha sido Investigador invitado en el Mathematics Research Branch, National Institutes of Health, USA, donde le fué otorgado el Fogarthy Research Fellowship Award, en 1986-1987. Tutor del Posgrado en Ciencias e Ingeniería de la Computación de la División de Estudios de Posgrado y Responsable del Laboratorio de Dinámica no Lineal del Departamento de Matemáticas.

# DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ALARMAS ANDON EN ÁREAS ESPECÍFICAS EN SMELTEK S.A DE C.V. AGUASCALIENTES.

B. Téllez<sup>1,a</sup>, A.F. Monroy<sup>2,b</sup>, G. Brianza<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Estudiante del modelo Dual Universitario, colaborador SMELTEK

<sup>2</sup> Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Gerente departamento de Mejora Continua SMELTEK

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica de Aguascalientes, Área de electromecánica Industrial y Energías

<sup>a</sup> etg.bernardo11@gmail.com, <sup>b</sup> alfonso.monroy@smeltek.mx, <sup>c</sup> gerardo.brianza@utags.edu.mx

**Resumen**— El presente trabajo toma como punto de partida la mejora continua en los procesos productivos en la empresa SMELTEK S.A de C.V. utilizando la herramienta del Lean Manufacturing; ANDON. Al culminar el presente trabajo, la elaboración de un análisis permitirá distinguir los datos esenciales para realizar una propuesta para la implementación del sistema ANDON en área de esmerilado, barrenado y soldadura. Tomando todo lo anterior como punto de partida que permitirá el diseño de un modelo que pueda ser estandarizado e implementado en el resto de los procesos productivos dentro de la compañía. Se muestran las fases de la metodología utilizada de mejora, medir, analizar, mejorar y controlar.

Como objetivo principal se muestra la mejora en la comunicación interna al momento de dar solución a un problema y evitar con esto que los operarios continúen en la repercusión de la calidad del producto final.

**Palabras clave.** Lean Manufacturing, comunicación, proceso, costos, control.

## 1. Introducción

El método de producción de piezas mediante la fundición es un proceso donde intervienen un numero elevado de variantes relacionadas una con la otra. Para hacer un levantamiento y evaluar la situación actual del proceso identificado, deberá realizarse un trabajo de campo dentro de los procesos para conocer a fondo su funcionamiento [1]. Los defectos, que suelen aparecer en las piezas metálicas, tienen en general su origen en que alguna parte del proceso que se pasó por alto y no fue debidamente controlada en el momento.

En el proceso de modelo se debe tomar en cuenta la disminución de las dimensiones ocasionadas por la contracción de la pieza colada en el proceso de enfriamiento y solidificación, la rugosidad de las superficies de la pieza depende de la calidad de la arena [2]. Un sistema que se capaz de visualizar y dar seguimiento en el momento que surgen estas variables en el proceso de producción, la incidencia en piezas defectuosas se puede reducir en gran medida, generando mayor disponibilidad y productividad,

El presente trabajo está enfocado en el diseño de un sistema Andón en las áreas de esmerilado, barrenado, soldadura, en la empresa ESMELTEK S.A de C.V. El mismo dedica el capítulo I a las generalidades de la empresa, en seguida de la introducción. El capítulo II comprende objetivos, descripción del problema, alcance, limitación, justificación, teoría, y

resultados esperados. En el capítulo III se trata todo lo relacionado al desarrollo del proyecto; explica la metodología que se siguió, presupuesto, así como los indicadores de variables que se establecieron para medir la efectividad del mismo.

Finalmente, el capítulo IV presentarán conclusiones y recomendaciones pertinentes, así como referencias bibliográficas y anexos.

## 2. Desarrollo del proyecto:

### Antecedentes

Una buena comunicación interna dentro de una empresa se caracteriza por ser eficiente, fácil de trabajar y más rápida a la hora de satisfacer las diferentes necesidades de la empresa. Muchos son los métodos que existen para hacer esta tarea más fácil y muchas son las empresas que ya en Aguascalientes implementan técnicas para hacer llegar la información de lo que está ocurriendo dentro y fuera de la planta en forma eficaz para hacer posible que todos los sectores sean atendidos de forma oportuna.

Hablando en concreto de la empresa Smeltek S.A de C.V y luego de haber completado una estancia de dos semanas, una de las cosas que más resalto fue la organización en todo el proceso de manufactura y cómo es que su deficiencia afecta el flujo de los productos y por consiguiente los insumos finales de la empresa.

### Descripción de la Problemática:

En la planta no hay como tal un sistema que permita informar a las partes interesadas de cualquier anomalía que surja en el proceso de producción de una manera inmediata, el único medio a través del cual los líderes y supervisores reportan los incidentes es en forma de llamada telefónica, lo que se requiere es mejorar la comunicación interna a la hora de darle resolución a un problema y evitar así que los operarios tomen decisiones que puedan afectar la calidad del producto final. La comunicación deberá ser aquella que permita establecer y formar una cultura de sus normas, estableciendo una amplia comunicación entre los funcionarios de la organización en todos sus niveles [3].

## Marco Teórico:

### Lo que hace un sistema de andón:

- Andón permite acciones correctivas oportunas alertando al personal cuando ocurren las condiciones anormales.
- Permite que los líderes del equipo pasen menos tiempo y esfuerzo supervisando la situación, y más tiempo solucionando las anomalías.
- Permite que los líderes de los equipos de trabajo supervisen al equipo y al personal con más eficacia.

En esta sección se describen los detalles de cómo se realizó el trabajo que se presenta, incluyendo el método o técnica empleada y, en caso necesario, su justificación, así como los resultados obtenidos. Esta sección puede estar compuesta por una o más subsecciones, como se ilustra a continuación.

## ANDON

No soluciona las anomalías, no evita que todos los defectos sean pasados adelante, ni substituye la buena comunicación verbal entre los grupos de trabajo. Es un sistema de señales para reportar fallas en el proceso productivo, ocasionalmente un tablero con luz visible para todos los involucrados del proceso productivo, con esto, cualquier trabajador puede alertar acerca de máquinas dañadas, defectos de calidad y otros hechos que requieran atención inmediata para continuar con el proceso [4].

## Presupuesto.

TABLA 1 PRESUPUESTO PARA ALARMA ANDÓN EN EL ÁREA DE ESMERILADO, BARRENADO Y SOLDADURA.

NOMBRE DEL COMPONENTE	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
Torreta rotativa 130 vac 119 x 151 mm mod. s125u	1 pza	\$ 796.00	\$ 796.00
Zumbador para empotrar 100x100 mm 75 db 8 tonos	1 pza	\$ 1,307.04	\$1,307.04
Cable "flex" calibre 16 awg, 60°C, 600 volts, color negro	30 metros	\$ 4.53	\$ 135.90
Caja ciega 80 x 135 x 70 mm plástico gris mca. segi	1 pza	\$ 237.00	\$ 237.00
Clemas	4 pzas	\$ 9.80	\$ 39.20
Limit switch tz-8108	1 pza	\$ 285.00	\$ 285.00
		<b>SUBTOTAL</b>	\$ 2,800.14
		<b>IVA</b>	\$ 448.02
		<b>TOTAL</b>	\$ 3,248.16

## Resultados generales esperados:

Se espera una mejora en la comunicación interna para lograr una reducción considerable en los tiempos muertos, ayudando a las partes interesadas a pasar menos tiempo y esfuerzo supervisando la situación, y más tiempo solucionando las anomalías. Las pruebas que se lleven a cabo serán la base para determinar las características finales que el sistema Andón tendrá que cumplir, así como la identificación de las condiciones que deben de ser medidas y el protocolo que los equipos de atención deban seguir. Se espera dejar claras variantes como el diseño del mismo circuito en los alrededores de la empresa; discriminando si es más importante la señal auditiva o la señal visual, o ambas.

## Diseño de investigación.

El presente apartado describe las estrategias empleadas que se utilizaron para abordar el problema planteado. La investigación se dividió en dos bloques; el primero documental y un segundo de campo.

La investigación documental trata las definiciones de ANDON, así como otros conceptos relevantes en el proyecto; se revisaron diversas fuentes bibliográficas, así como consultas en internet para ampliar la comprensión del tema.

La investigación de campo "consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna" [5]. La recolección de datos se tomó de los tableros indicadores que se fabricaron para las diferentes áreas de la empresa. Asimismo, se realizaron rondines en la planta que sirvieron para tomar en cuenta los requerimientos que debían de cumplir las alarmas.

## Definición de la ubicación de los puntos de llamada y visualización

La ubicación de los dispositivos para efectuar las llamadas fue definida tomando en cuenta varios aspectos. Los requerimientos básicos para las alarmas ANDON fueron los siguientes:

- Contar con un indicador visual en un punto estratégico fácil de visualizar en toda el área de esmerilado, barrenado y soldadura.
- Debe poseer un indicador sonoro que sea perceptible aun con el ruido de la maquinaria de trabajo.
- Estaciones de llamado por medio de agarraderas de fácil acceso para la función de: llamado de asistencia al operario y llamado de seguridad (paro de emergencia).

- Debe de accionarse sin aplicar tanta fuerza al tirar de la agarradera.

### Definición de Lay Out

El primer paso fue la definición del Lay Out de las áreas donde se colocarían las alarmas, el resultado se obtuvo tras realizar varios rondines en toda la empresa y discutir las posibles ubicaciones con gestión de calidad y el gerente de mejora continua.

En la figura 1 muestra la distribución de las alarmas dentro de la empresa.

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE SIMBOLOGÍA

ID	Ubicación	Tipo	Sistema
1	Terminado	Torreta	Alarma
2	Terminado	Zumbador	Alarma
3	Terminado	Agarradera	Encendido/apagado
4	FOAM	Agarradera	Encendido/apagado
5	Esmerilado	Torreta	Alarma
6	Esmerilado	Zumbador	Alarma
7	Barrenado	Agarradera	Encendido/apagado
8	Esmerilado	Agarradera	Encendido/apagado
9	Soldadura	Agarradera	Encendido/apagado
10	Moldeo no bake	Torreta	Alarma
11	Moldeo No bake	Zumbador	Alarma
12	Moldeo No Bake	Agarradera	Encendido/apagado
13	Fusión	Zumbador	Alarma

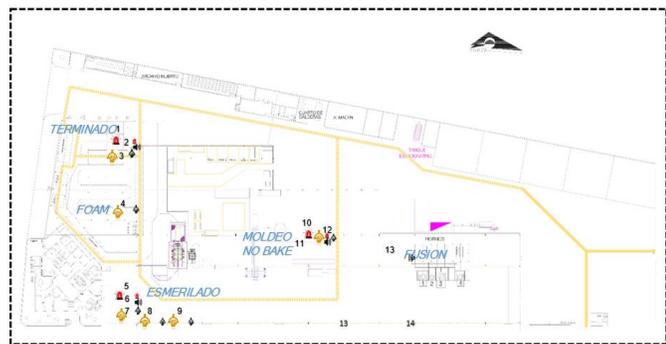


Fig 1. Ubicación previa de alarmas Andón, zumbadores y agarraderas

### Determinación de las condiciones que deben ser medidas

El área de esmerilado cuenta con cuatro áreas dedicadas a los trabajadores, se encarga de retrabajar las piezas que presenten aspecto basto, hinchazones, abombamientos, penetraciones, exfoliaciones, inclusiones de arena y dartsas.

La alarma atiende tres factores fundamentales:

1. Detección de la falla en maquinaria
2. Pieza No Good
3. Problema presentado en el proceso

### Fabricación del soporte sistema Andón.

Esta etapa tuvo una duración de una semana. Para proceder con la fabricación e instalación física del Andón fue necesaria la participación del estudiante en el soldado, cortado, esmerilado y pintado del soporte para el limit switch, así como las agarraderas. Las actividades de unión y corte de metal tuvieron lugar en el taller de soldadura de la empresa, se utilizaron equipos como micro alambre para soldar, pulidora para realizar cortes, esmerilado y pulido en piezas con imperfecciones, oxicorte y taladro para hacer los barrenos.

### Diseño del circuito

El diseño del circuito se pensó tomando en cuenta las especificaciones que pedía el departamento de mejora continua de la empresa SMELTEK S.A de C.V en cuanto a la fabricación de un sistema que fuera eficiente, creativo, funcional y viable económicamente.

Previo a la elección del circuito final, el circuito base que se iba a utilizar constaba de un número determinado de botones con enclave que dependería del número de áreas a cubrir, conectados en paralelo que cerrarían el circuito en el instante en que se presionara alguno de ellos, encendiendo la alarma como se muestra en la Figura 2.

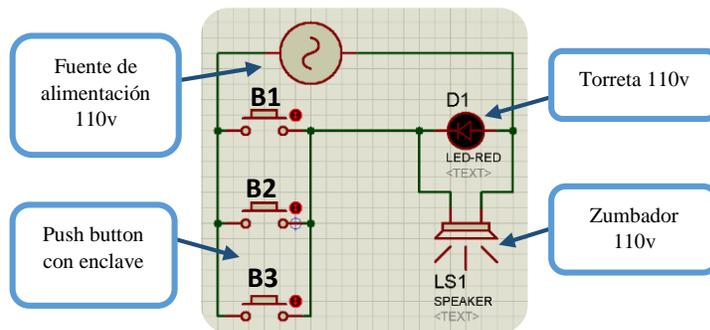


Fig 2. Circuito Andon con tres botones

Dada la necesidad de reducir costos y crear un sistema más eficiente se decidió sustituir el método de accionamiento del circuito, así como su funcionamiento. Ahora en lugar de botones se utilizó un sistema de cuerdas con poleas y agarraderas, que mediante un movimiento mecánico (tirón de la cuerda) cierra el contacto del *limit switch*, que en seguida acciona un circuito de tres relevadores que encienden la alarma con un tirón de cuerda y dejan enclavado el circuito hasta que un segundo tirón la apague.

La Figura 3 muestra el diagrama de escalera del circuito final que se diseñó para las alarmas.

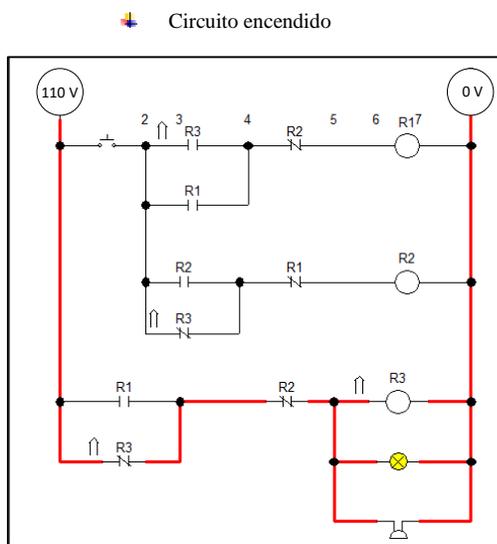


Fig 3. Circuito Andon de tres relevadores accionado con limitó switch.

En el diagrama de escalera se pueden identificar tres componentes con las marcas R1, R2 y R3; estas representan las bobinas de cada uno de los tres relevadores. El único botón normalmente abierto representa al contacto normalmente abierto del *limit switch*. Finalmente se pueden observar la torreta y el zumbador conectados en paralelo con la bobina R3.

**Funcionamiento del sistema:**

Durante los procesos de producción, el operario será capaz de accionar la alarma tirando de la cuerda en cualquier momento, siempre y cuando se trate de la detección de alguna pieza No Good, falla en maquinaria o cualquier problema presentado en el proceso.

El procedimiento a seguir en caso de ocurrencia de falla puede resumirse en cuatro pasos:

- **Paso 1:** Detección de la falla en maquinaria, pieza No Good o algún problema presentado en el proceso.
- **Paso 2:** Tirar de la cuerda --> detiene la producción en el área donde surge el problema para dar aviso al LIDER aplicando el plan de reacción Parar-Llamar-Esperar.
- **Paso 3:** LIDER evalúa la situación, recopila información y notifica el problema a las partes interesadas a través de un radio, aplicando el plan Parar-Llamar-Esperar.
- **Paso 4:** Los integrantes correspondientes de las partes interesadas atiendan el problema para darle solución desde la causa raíz.

**Implementación de tableros indicadores:**

Durante la colaboración se fabricaron tableros como el que se muestra en la Figura 4, los cuales fueron fundamentales en la investigación de campo. Se colocaron en las áreas de terminado, esmerilado, moldeo *no bake* y fusión.

Para explicar cómo se llevó el control de los tableros hay que entender que en la empresa se denomina “líder” a los responsables de cada área de producción. Para iniciar con los tableros indicadores, se organizó una plática donde se reunieron a todos los líderes y se les pidió que llenaran los tableros diariamente. El formato a llenar es el siguiente: Cuando ocurra alguna falla en relación con las 6 m’s, o cuando se detecta un producto No Good, se escriben en DESCRIPCION DE LA FALLA, en el renglón correspondiente a la hora y palomeando en los recuadros de qué tipo de falla con respecto a las 6 m’s se trata.



Fig 4. Tableros indicadores de fallas

La función principal de estos tableros es evidenciar el índice de fallas ya sean de maquinaria, mano de obra, método, etc. Con el objetivo de generar un registro que nos permita comparar que tanto afecto positiva o negativamente el sistema Andón.

A la recolección de datos se le dio un seguimiento aproximado de dos semanas. Consistió en supervisar diariamente las anotaciones registradas en los tableros, al final de cada turno. Las fallas se borran del tablero únicamente cuando ya se les había dado resolución, independientemente de los días transcurridos. El concentrado se fue archivando en un documento en Excel; las fallas más frecuentes se originaron por la falta de mantenimiento en grúas y horno.

### Resultados de tableros indicadores

En cuanto al conteo de fallas de los tableros indicadores se obtuvieron los siguientes datos:

TABLA 3. CONCENTRADO DE FALLAS REGISTRADAS EN EL MES DE JULIO

Falla detectada en:	Cantidad de ocurrencias
FUNCIONAMIENTO DE GRUAS VIAJERAS	4
FUNCIONAMIENTO DE GRANALLADORAS	1
ELEVADORES DE ARENA	1
ESMERIL HACE CORTO	1
FUNCIONAMIENTO EN EL HORNO	3
FUNCIONAMIENTO EN COMPRESOR	1
VIBRADORES (MOLDEO AL VACIO)	1
EMBAUCADO DE LA OLLA	1
FUGAS EN TUBERIA	1
RETENCION DE LIQUIDO EN PISTON NEUMATICO	2
ARENA HUMEDA	2

Como se puede observar el muestreo que se llevó a cabo, en un periodo de dos semanas, indica que hubo mayor numero incidencias en el funcionamiento del horno de inducción y las grúas viajeras en el mes de junio.

Dichos indicadores servirán posteriormente para cuantificar que tanto impacto tuvo el andon en los procesos productivos, así como que tantos tiempos muertos suprimió o no en comparación.

### Descripción de los resultados obtenidos.

Se ejecutó exitosamente la instalación de la alarma andon, conformada por el zumbador, la torreta, así como su caja de control destinadas a las áreas ya mencionadas, como lo muestra la figura 5.

El circuito funciono correctamente en todo momento, el zumbador demostró tener la potencia suficiente como para ser percibido auditivamente aun con el ruido que generan todas las máquinas de la empresa. Al mismo tiempo la torreta fue visible y los requerimientos esperados fueron cumplidos. A través de la visualización y el sonido, el sistema Andon alerta a los miembros del equipo, líderes, personal de mantenimiento y estos son capaces de canalizar la información para llamar a la persona indicada que pueda resolver algún problema específico en las estaciones de trabajo.

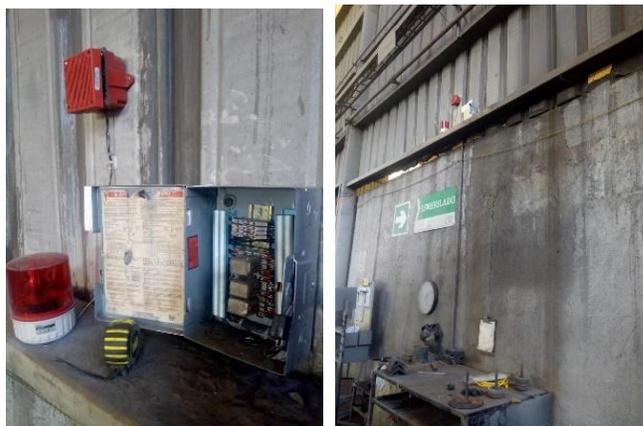


Fig 5. Muestra la instalación de la alarma Andon para las áreas de esmerilado, barrenado y soldadura.

La prueba preliminar permitió la obtención de información para medir el grado de satisfacción, nivel de interés por parte de los operarios, colaboración y dificultades encontradas en la realización de esta experiencia en relación con los objetivos previstos.

Por su parte el sistema de accionamiento con cuerdas que se había planeado en un principio también requirió una reevaluación, considerando nuevas variantes emergentes. Las pruebas de campo revelaron que había que incluir un modo de volver más suave el movimiento de la cuerda a través de las armellas, ya que al jalar la agarradera los dobleces y curvaturas que hacia la cuerda entre las armellas creaba mucha fricción y por ende se necesitaba ejercer mucha más fuerza sobre la agarradera para activar el circuito. Así pues, se optó colocar una polea para mejorar el movimiento de la cuerda. Esta decisión soluciono dos problemáticas:

1. Reducción en gran medida el rozamiento entre la cuerda y la armella por donde baja la agarradera, produciendo que el tirón sea mucho más suave y se necesite emplear menos fuerza.

2. Al disminuir la fuerza de rozamiento la cuerda ya no se desgasta tanto como lo hacía anteriormente.

Para determinar el grado de cumplimiento de los objetivos propuestos en el proyecto, se toma como punto de referencia el potencial que el Andon tiene para reducir o eliminar tiempos muertos, siempre y cuando se siga el plan de reacción: Parar-Llamar-Esperar. Permitiendo la toma acciones correctivas, de contención y preventivas de una manera más oportuna por parte de los departamentos calidad y producción

### 3. Conclusiones

Se concluye que la primera etapa de instalación del piloto fue completada dentro de las áreas ya designadas, sin embargo, el éxito del sistema dependerá en gran parte del correcto uso que le den los operarios respetando el procedimiento Parar-Llamar-Esperar.

Se creó un sistema que cumplió con las especificaciones de la empresa, especialmente en cuestión de funcionalidad, a un menor costo que el que representaba el planteado inicialmente. También fue posible llegar a la conclusión de que lo más importante es detectar cuales son las necesidades que el personal encargado de realizar los procesos para realizar su trabajo de manera más eficaz. Dejando claro cómo es que las nuevas mejoras benefician en cuestiones económicas, laborales y de cualquier otro tipo, para bien de la empresa.

Por su parte el estudiante, adquirió muchos conocimientos en su mayoría de carácter técnico, como el manejo de herramientas industriales; pulidora, moto tool, soldadura con micro alambre, entre otros. Y más importante aún se formó una noción más realista de lo que significa diseñar proyectos aun nivel empresarial.

### 4. Referencias

- [1] Natalia Marmolejo, Ana Milena Mejía, Ileana Gloria Pérez-Vergara, Mauricio Caro, José A. Rojas. Mejoramiento mediante herramientas de la manufactura esbelta, en una Empresa de Confecciones. [ed.] SciELO. 1, 2016, Ingeniería Industrial, Vol. 37, pp. 2-3. ISSN 1815-5936.
- [2] Aquino, Leonel Miguel González. Elaboración e implementación de manuales de diseño y construcción de modelo moldes de arena para fundición de aleaciones de aluminio. Universidad del Salvador Facultad de Ingeniería y Arquitectura Escuela de Ingeniería Mecánica, El Salvador: 2015.
- [3] Castro, Adela de. Manual práctico de comunicación organizacional. Barranquilla, Colombia: Universidad del Norte, 2017. Primera edición.
- [4] Castro, Alex Javier Noboa. Implementación del sistema ANDON en el área de apurado central para la gestión automática de imprevistos en un proceso productivo de la empresa plasticacho industrial. Universidad

Tecnológica Indoamérica Facultad de Ingeniería y Tecnologías de la Información y la Comunicación, Ambato – Ecuador: 2018.

- [5] Sabino, Carlos. El proceso de investigación. Guatemala: Episteme, 2014. p. 104. ISBN: 978-9929677074.

### 5. Biografías

**Bernardo Téllez Gómez.** Estudiante de quinto cuatrimestre de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica en la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Colaborador como estudiante Dual Universitario en la empresa Smeltek, S.A. DE C.V. Aguascalientes, Ags. Línea de investigación en proyectos de control automático.

**Alfonso Felipe Monroy Domínguez.** Ingeniería industrial y de sistemas. Gerente de mejora continua en Smeltek S.A. de C.V. Responsable de la reestructura de los procesos de manufactura para la optimización de las operaciones. Experiencia en procesos fundición y estampado para la industria automotriz. Consultor en desarrollo de proveedores para la industria automotriz y aeroespacial. Especialidad en manufactura esbelta, modelación dinámica e ingeniería de valor.

**Gerardo Brianza Gordillo.** Maestro en Manufactura Avanzada. Ingeniero Mecánico. Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Tecnológica de Aguascalientes. Responsable del cuerpo académico en consolidación de sistemas mecatrónicos, miembro de la Comisión Técnica Iberoamericana de Robótica y Mecanismos. Profesor de referencia del Modelo Dual Universitario. Líneas de investigación en diseño, modelado y simulación mecánica, sistemas hidráulicos y neumáticos.

# Uso de árboles de decisión para la detección de plagas y enfermedades en los cultivos de aguacate en México

M. E. López Pérez<sup>1, a</sup>, L. F Columna Álvarez<sup>1, b</sup>, G. M. Ojeda Pérez<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ingeniería en Computación

<sup>a</sup> lopezp.marcose@gmail.com, <sup>b</sup> fernando\_gearsof\_95@hotmail.com, <sup>c</sup> opmitch.g@gmail.com

**Resumen**—Se pierde aproximadamente un tercio de producción de aguacate debido a plagas y enfermedades, por lo que se diseñó un sistema que ayude a distinguir oportunamente este mal. Se hizo uso de un algoritmo de árbol de decisión de tipo ID3, donde se obtuvieron 20 reglas de derivación que permiten la predicción deseada con un porcentaje de error del 4.42%, se diseñó una aplicación que permite tener un diagnóstico oportuno, con lo que se logre disminuir el porcentaje de pérdida de cultivos de aguacate.

**Palabras clave.** Árboles de Decisión, Plagas, Aguacate, Inteligencia Artificial.

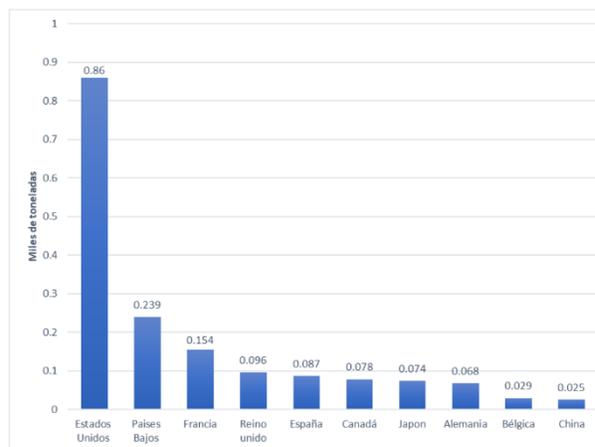
## 1. Introducción

### 1.1 El aguacate

El aguacate es uno de los productos más exitosos de la exportación nacional. México es el principal proveedor con 45.95% del valor de las exportaciones mundiales. De acuerdo con la Asociación de Productores Empacadores y Exportadores de Aguacate de México (APEAM), durante el último medio año de 2017 se exportaron 353.517 toneladas de fruto fresco, tan solo a Estados Unidos, no solo se exporta a este país, si no, también a Canadá, Guatemala, el Salvador, España, Francia, Países Bajos, Japón, inclusive llega a países con los cuales no hay tratado de libre comercio [1].

Al ser uno de los principales productores de aguacate, y sobre todo exportadores, se tiene la responsabilidad de llevar productos de calidad y sin ninguna plaga o enfermedad. En la Fig. 1 se muestra a los principales importadores mundiales de aguacate, donde se observa que Estados Unidos es el principal importador, dado que en el 2018 adquirieron cerca de 100 mil toneladas de aguacate mexicano [2].

La Figura 2 muestra una tabla del crecimiento promedio anual, con datos desde 2016 y una estimación hasta 2030. Esto demuestra que el área aguacatera tiene un amplio potencial, con lo que se pretende impulsar, además del crecimiento inercial estimado, con cuidado y buen aprovechamiento de la producción.



**Fig. 1** Gráfica de principales importadores de aguacate - Planeación agrícola nacional 2017-2030 SAGARPA [3]

AÑO/PERIODO	ESTIMACIONES				CRECIMIENTO ACUMULADO				CRECIMIENTO PROMEDIO ANUAL	
	2016	2018	2024	2030	2003-2016	2016-2018	2016-2024	2016-2030	2003-2016	2016-2030
Producción Potencial (millones de toneladas)	1.89	2.05	2.61	3.16	1.0876	0.0874	0.2692	0.6728	5.82	3.49
Exportaciones (millones de toneladas)	1.02	1.17	1.65	2.14	7.2278	0.1415	0.4177	1.0904	0.176	0.0504
Valor de exportaciones (millones de dólares a precios del 2016)	2227.25	2542.44	3604.4	4655.78						

**Fig. 2** Tabla de crecimiento anual - Planeación agrícola nacional 2017-2030 SAGARPA

De las estadísticas de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) en el 2017, una de cada 10 personas enferma por consumir alimentos contaminados y muchas de las nuevas enfermedades son originados por estos cultivos contaminados. A nivel nacional México pierde el 30% de sus cultivos por plagas o por inundaciones. Si los cultivos no cumplen con ciertas normas no pueden ser comercializados lo que provoca pérdidas monetarias.

Para el aguacate las plagas reglamentadas que limitan la comercialización son: el barrenador de ramas del aguacate (*Copturus aguacatae*), cuyos daños provocan que las ramas se rompan con facilidad; el barrenador pequeño del hueso del aguacate (*Conotrachelus perseae* Barber), el barrenador

grande del hueso del aguacate (*Heilipus lauri*); y la palomilla barrenadora del hueso (*Stenoma catenifer*), las cuales ocasionan daños en el fruto cuando las larvas se alimentan de la pulpa y del hueso, situación que afecta su rendimiento y puede provocar hasta un 90% de pérdidas si no se realizan acciones de control.

A pesar de que ya hay zonas libres de estas plagas en México, todavía hay estados donde el porcentaje es menor como Chiapas, Colima, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Nuevo León, Estado de México, Hidalgo y Veracruz, por lo que, es importante el correcto manejo de cultivos, pero, sobre todo, identificar y dar alertas oportunas para realizar control de plagas correspondientes.

Durante la investigación realizada, se encontró que las principales plagas que afectan el cultivo del aguacate son las siguientes:

- Los Trips (*Heliethrips haemorrhoidalis*) son de particular importancia, debido a que en el pericarpio de la fruta atacada pueden provocar el desarrollo de protuberancias que reducen su calidad estética. El daño que provoca en el caso más extremo es la caída del fruto o heridas que permiten la entrada de enfermedades. Los daños se hacen más visibles conforme el fruto se desarrolla, ocasionando pérdida de calidad en su presentación.
- Barrenador Pequeño del Hueso (*Conotrachelus perseae* y *C. aguacatae*). Es una de las plagas más perjudiciales para el fruto. Provoca la caída de los frutos.
- Barrenador de Ramas (*Copturus aguacatae*). La larva se alimenta de madera de las ramas más jóvenes, de ahí parten las galerías en un desplazamiento paralelo a los tejidos y barrenando hasta el inicio de la pupación.
- Agallador del Aguacatero (*Trioza anceps* Tuthill). La ninfa es de color amarillo pálido. Para alimentarse se fijan en el haz de las hojas tiernas. Esto trae como consecuencia una debilidad general de la hoja, ya que en cada una de ellas suelen fijarse cientos de ninfas.
- Palomilla Barrenadora del Hueso (*Stenoma catenifer*). Recien reportada en México, por primera vez en el estado de Querétaro en el 2011, lo que abre nuevas consecuencias en el país.

## 1.2 Árboles de decisión

En inteligencia artificial hay varias maneras de solventar problemas de predicción, una que es muy útil a la hora de manejar aprendizaje automático es el uso de algoritmos de árboles de decisión, principalmente si se hace uso de valores nominales.

Un árbol de decisión es una forma gráfica o analítica de descripción de sucesos de forma escalonada que permite hacer un seguimiento paso a paso de éstos para obtener predicciones. Además, debido a su carácter gráfico son de fácil comprensión aun así con gran número de datos, ya que la naturaleza del algoritmo es “podar” las hojas que no representen información significativa. [4]

## 2. Antecedentes

En 1989, Julio Vecino Berbel escribió “La inteligencia artificial en la agricultura: Perspectivas de los sistemas expertos” [5], dio pie a que a partir de la década de los 80, se aplicara la inteligencia artificial y en específico una de sus ramas, sistemas expertos, el cual tiene lugar en una gran variedad de actividades humanas. Los sistemas expertos se han convertido en un instrumento poderoso y que posee un gran potencial diferentes áreas.

Una de estas áreas es la agricultura, y el futuro es nuestro presente, como lo demuestra Javier Montoya, que, en 2015, con su libro “Intelligent System for plague control in crops”, confirma lo que Julio Vecino Berbel escribió. Así, en la actualidad el desarrollo de las tecnologías para aliviar problemas que facilitan la producción agrícola representa una herramienta de gran impacto en la agricultura [6].

Aún más recientemente Juan Carlos Galindo manifiesta que la “agricultura e inteligencia artificial serán inseparables”, pero el hecho del “serán” demuestra que hay lugar de exploración y un gran potencial de investigación [7].

El principal objetivo de este trabajo es que a través de una aplicación y con la ayuda de árboles de decisión se logren identificar, cualquiera de las plagas y enfermedades que pueden atacar los cultivos del aguacate.

Para iniciar el desarrollo del sistema se tuvieron que definir las variables y para esto se usó un artículo publicado por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, escrito por Jimenes Andrés en 2009, donde se tiene un sistema de análisis de información para la clasificación y manejo de plagas de un duraznero [8].

En consecuencia, se decidió crear una aplicación capaz de reconocer el tipo de plaga con solo ingresar los valores

necesarios, para definir la plaga mediante las reglas de derivación que se obtuvieron por medio del método antes mencionado. Así se dará instrucciones para el manejo dependiendo del tipo de plaga y, por último, se lanzará una alerta para que instituciones como SENASICA o SAGARPA puedan tener en cuenta y tomen acciones para el control de plagas.

### 3. Método

Se analizaron las características de las plagas que afectan los cultivos de aguacate; cómo se ven los insectos o bacterias; y qué efectos visuales tienen sobre los árboles de aguacate, como color de hojas, color en ramas o tronco, cáscara del aguacate, entre otros. Con los datos obtenidos se seleccionaron variables características de estas plagas, obteniendo así 15 variables para 12 tipos de enfermedad o plaga.

Como resultado de la investigación, se obtuvo una base de datos, los cuales se obtuvieron mediante la recopilación de imágenes y artículos sobre plagas en aguacate. Las Tablas 1 y 2 muestran extractos de la base de datos obtenida. En dichas tablas, la primera columna corresponde a las 12 enfermedades o plagas y en la primera fila comprende las 15 variables que se manejan para la obtención de datos.

Nombre	color fruto	protuberancia	hueso	hoja	Fruto forma	Larva	color rama	color hoja
Trips	Cafe	Cascara	Normal	Seca	Deformado	Si	Normal	Blanco
Barrenador de rama	Negro	Nula	Dañado	Seca	Normal	Si	Normal	Blanco
Barrenador de hueso	Negro	Nula	Dañado	Normal	Normal	Si	Normal	Blanco
Palomilla barrenadora	Blanco	Nula	Dañado	Seca	Necrosado	Si	Normal	Blanco
Agallador aguacatero	Amarillo	Hojas	Normal	Marchita	Normal	Si	Normal	Amarilla
Tristeza del aguacate	Blanco	Nula	Normal	Seca	Normal	No	Normal	Amarilla
Anillamineto de pendulo	Purpura	Nula	Negro	Normal	Redondo	No	Negro	Verde
Marchitamiento	Cafe	Hojas	Normal	Amarilla	Normal	Si	Negro	Verde
Cancer de tronco y de rama	Cafe	Ramas	Normal	Normal	Normal	No	Negro	Verde
Antracnosis	Cafe	Cascara	Normal	Manchas	Necrosado	No	Normal	Verde
Sarna o roña	Cafe	Cascara	Normal	Normal	Deformado	No	Cafe	Blanco
No es plaga	Verde	Nula	Normal	Normal	Normal	No	Normal	Verde

Tabla 1. Extracto de la base de datos, primeros 8 atributos.

Nombre	rama seca	rama anillosa	ramanecrosada	color hueso	Manchas en hoja	Desarrollo fruto	ColorLarva
Trips	Si	No	No	Normal	No	Pequeño	Cafe
Barrenador de rama	Si	No	Si	Normal	No	Pequeño	Cafe
Barrenador de hueso	No	No	No	Cafe	No	Pequeño	Cafe
Palomilla barrenadora	Si	No	No	Cafe	Si	Pequeño	Cafe
Agallador aguacatero	Si	No	No	Normal	Si	Normal	Amarilla
Tristeza del aguacate	Si	No	Si	Normal	No	Pequeño	NA
Anillamineto de pendulo	Si	Si	Si	Normal	No	Podrido	NA
Marchitamiento	Si	No	Si	Normal	Si	Normal	Blanca
Cancer de tronco y de rama	Si	No	Si	Normal	No	Normal	NA
Antracnosis	Si	No	No	Normal	Si	Normal	NA
Sarna o roña	No	No	Si	Normal	Si	Mediano	NA
No es plaga	No	No	No	Normal	No	Normal	NA

Tabla 2. Extracto de la base de datos, últimos 7 atributos.

Se utilizó como herramienta R-Project, para así, con la tabla generada aplicar el algoritmo de árboles de decisión ID3 y obtener las reglas de derivación y, por tanto, el árbol en forma gráfica. R-Project, es un software de computación estadística y de gráficos. Dentro de los paquetes que proporciona este software se encuentra el de árboles de decisión.

Un árbol de decisión es un grafo parecido a un diagrama de flujo, para llegar a puntos específicos dentro del árbol se necesitan tomar decisiones con base en ciertas reglas. El árbol

con el que se trabaja funciona con base en el algoritmo ID3, que significa Inducción a través de árboles de decisión, desarrollada por John Quinlan (1983).

El árbol proporciona como salida una decisión que puede ser sí o no (booleano), aunque también es posible representar funciones con un mayor rango de salidas. Lo que busca el árbol es estimar las probabilidades de las respuestas.

Por otro lado, la entropía es un término que se refiere a una medida de incertidumbre. En este caso es usada para decidir qué atributo o atributos deben seleccionarse. [9] Esta entropía se calcula de la siguiente manera:

$$Entropía(S) = \sum_{i=1}^n x_i - ip_i \log_2 p_i \quad (1)$$

Donde:

- S: Es una colección de elementos.
- pi: Es la probabilidad de los posibles valores.
- i: Son las posibles respuestas de los elementos.

Por otra parte, mediante el lenguaje de programación C# se implementaron las reglas de derivación que proporcionó el software para llevar a cabo una aplicación, donde solo se debe introducir las características del fruto, hoja o rama y la aplicación devuelve si éste está enfermo, posee una plaga o si es un fruto sano.

### 4. Resultados

Se investigó el flujo de plagas de tipo depredadora para el aguacate, encontrando en total once plagas y enfermedades, obteniendo así, un total de quince atributos que ayudaron a describirlas. El problema es que no hay una base de datos existente, por lo que, se realizó una tabla con los quince atributos y las once plagas.

Entre cada plaga se puede presentar ligeras variaciones, por ejemplo, en el caso de la Antracnosis, la hoja puede presentar manchas o no y parecer que no tiene nada, aprovechando estas ligeras diferencias se realizó una tabla con más identificadores variando los atributos.

En el método se muestra una porción significativa de la tabla utilizada, pero hay que tomar en cuenta que la tabla completa contempla un total de 384 datos, a los cuales se decidió particionarlos en un rango de entrenamiento del 70%, que da un total de 268 datos, y un rango de 30% para la validación, que representa 116 datos.

Una vez obtenida la tabla, con ayuda del software R se procedió a obtener las reglas de derivación por medio del algoritmo ID3. Se utilizó la parte gráfica, obteniendo así veinte reglas y el árbol mostrado en la Fig. 3. Mientras que en la Fig. 4 se presenta, como una muestra, la segunda instancia del nodo principal del árbol de decisión y la ruta que se toma para lograr tres reglas de derivación.

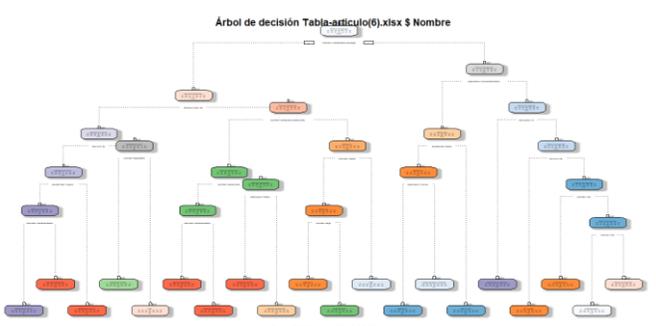


Fig. 3. Árbol de decisión generado en R Studio.

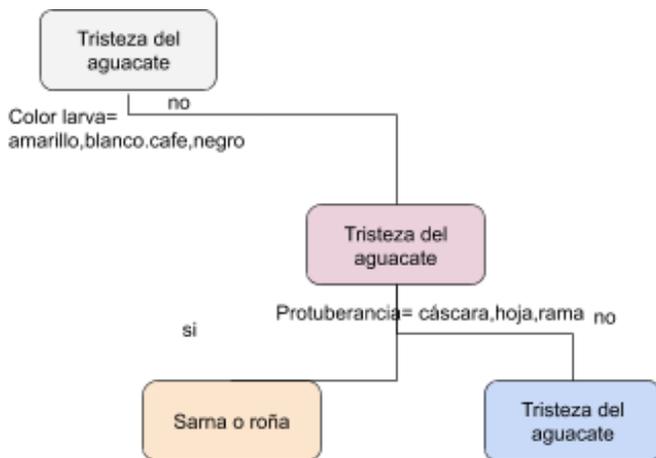


Fig. 4. Nodo raíz y segunda instancia.

La lectura del árbol se empieza con el nodo raíz, donde se cumple la condición de tener o no una larva visible, para tomar como siguiente instancia las protuberancias en las ramas y cáscara del fruto, para luego continuar con la condición de no tener ramas anilladas.

La Fig. 5 muestra la continuación de la segunda instancia. Se puede observar a detalle, las reglas obtenidas para las condiciones especificadas.

Por último, la Fig. 6 muestra la parte más baja del árbol de decisión, donde se puede observar el tipo de plaga que puede ser. Con base a la imagen corresponde: tristeza de aguacate y marchitamiento, donde se puede observar que marchitamiento puede darse mediante dos reglas de derivación, donde llegando a esta condición el fruto se presenta de color café o no, pero

que sí presenta hoja seca, también se acompaña de la probabilidad de cada decisión.

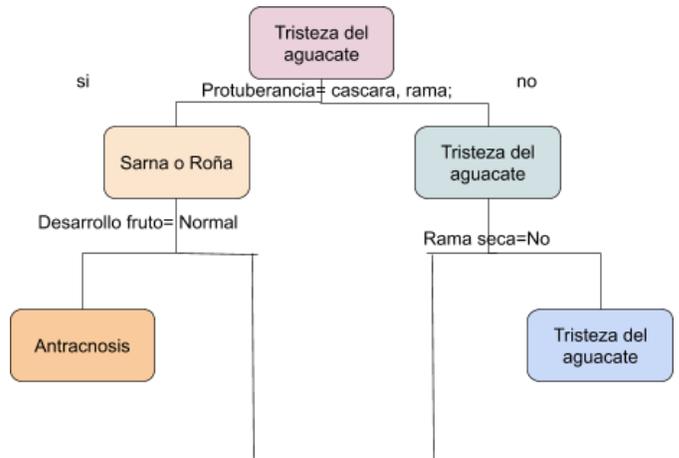


Fig. 5. Niveles intermedios del árbol de decisión.

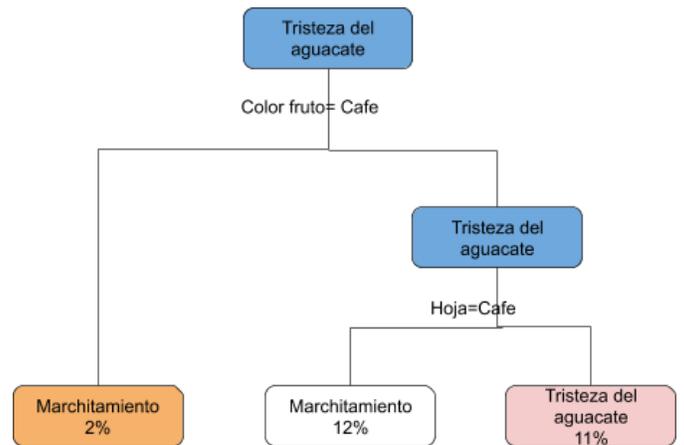


Fig. 6. Niveles finales y hojas de derivación.

Las reglas que se generaron son las que indican la forma en la que se formó el árbol. Estas reglas corresponden a los resultados obtenidos en el último nivel del árbol, este nivel da como resultado el tipo de plaga que se presenta en el fruto, hoja o rama, después de seguir diferentes decisiones que caracterizan a cada una de estas.

El formato de cada regla es el siguiente: aparece primero el número de regla seguido del nombre de plaga a la que corresponde, después el porcentaje que corresponde a cada plaga con base en sus características, pero como se mencionó anteriormente hay casos en los que se repite, esto se debe a que hay más de un camino con diferentes atributos que llevan a una misma plaga. Por último, se presentan las características que se utilizaron para llegar a este último nodo del último nivel de cada plaga.

En este caso la plaga que más posibilidad tiene de aparecer es la Palomilla Barrenadora, a pesar de que también otras plagas tienen más de una regla, ésta es la de mayor porcentaje. A continuación, se muestran las reglas que se obtuvieron para esta plaga.

- Rule number: 43 [Nombre=Palomilla barrenadora cover=21 (8%) prob=0.00 ColorLarva=Amarilla,Blanca,Cafe,Negro, Manchas en hoja=Si, color fruto=Amarillo, Blanco,Normal,Verde, protuberancia=Cascara,Nula
- Rule number: 41 [Nombre=Palomilla barrenadora cover=3 (1%) prob=0.00], ColorLarva=Amarilla, Blanca,Cafe,Negro Manchas en hoja=No, rama seca=No, Desarrollo fruto=Pequeño
- Rule number: 33 [Nombre=Palomilla barrenadora cover=3 (1%) prob=0.00], ColorLarva=Amarilla,Blanca,Cafe,Negro Manchas en hoja=No, rama seca=No, Desarrollo fruto=Pequeño

Se puede observar en las tres reglas características como: color de larva, manchas en hoja, color de fruto. Estas son características constantes, así también hay características que son variables como: protuberancias, forma del fruto o desarrollo del fruto, esto se debe a las variaciones que puede haber en esta plaga y que se logran cubrir gracias a estas reglas.

Por último, se realizó una aplicación de fácil entendimiento para el usuario final, donde el productor o persona interesada, sepa el estado de su producto al consultarla para saber si tiene o no un caso de plaga o enfermedad. En caso de ser afirmativo, saber con precisión y exactitud de cual se trata.

En la Fig. 7 se muestra la interfaz de la aplicación, donde el usuario puede seleccionar la opción que mejor describa su aguacate o árbol, al final se informa qué plaga es la que tiene. Se decidió meter la regla número 33, donde: color de larva es amarillo, hay manchas en hoja, su rama está seca, y el tamaño del fruto es pequeño y de forma redonda; como resultado se obtuvo que la plaga que se tiene es Palomilla Barrenadora.

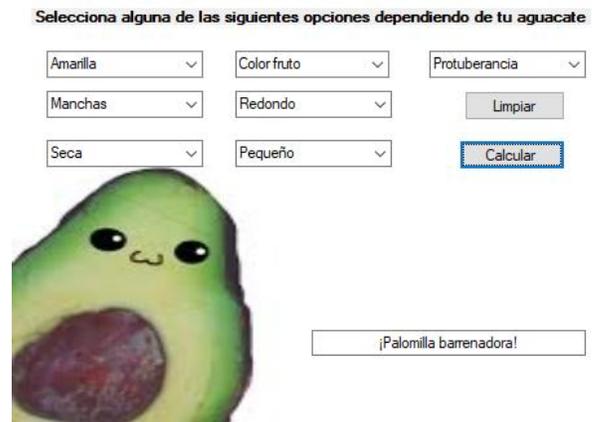


Fig.7 Interfaz de la aplicación para la inferencia con base en las reglas de derivación.

### 5. Conclusiones

Lo expuesto a lo largo de este trabajo permite arribar a la siguiente conclusión. México tiene un gran potencial agrícola, y un campo de oportunidad donde se puede empezar a atacar problemas es en el sector aguacatero, por la calidad del producto nacional que se exporta y por el capital que se maneja. Aunque hay diversas fuentes de conflicto en el manejo de producción agrícola, como el uso de suelo o el riego tecnificado, es importante el saneamiento de los cultivos.

La FAO establece que aproximadamente un tercio de la producción se pierde por plagas y enfermedades. Es en donde se deben diseñar técnicas para prevenir y solventar este problema. Para esto se puede hacer uso de la inteligencia artificial.

Hay muchas áreas donde la inteligencia artificial y la agricultura se pueden relacionar, pero desgraciadamente en nuestro país no se aplican nuevas tecnologías en este sector. Por lo que, es conveniente empezar la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, como el uso de árboles de decisión, que pueden ayudar a los productores y comerciantes en la validación del producto mediante estándares de calidad, de una manera rápida y sin complicación alguna.

Además, es notorio que el uso de la técnica presentada en este trabajo tiene una amplia aplicación, no solo en el aguacate, sino se puede ampliar la implementación para otros tipos de productos, ya sean frutas o verduras, de consumo u ornamental, y para hacer una reducción de pérdidas de cultivo.

Sin embargo, es imprescindible no quedarse en el pronto despliegue de acciones para combatir la plaga o enfermedad, sino en la prevención que además reduciría costos de operación

y haría cultivos más sanos y así tener un mejor aprovechamiento de recursos.

## 6. Trabajos futuros

Como trabajo futuro a corto plazo se necesita hacer investigaciones de campo en zonas aguacateras, lugares de cultivo y comparar los resultados que se tiene hasta ahora, con datos reales, para así afinar el porcentaje de error y sea un sistema con una alta precisión y comprobada fiabilidad.

A mediano plazo se debe crear una base de datos dinámica con la información recolectada, esto con la finalidad de servir de apoyo a las organizaciones que deseen aportar información para lograr hacer un sistema computacional más robusto, e incluso con participación de la SADER.

A largo plazo se pretende ampliar la gama de productos agrícolas que sean susceptibles a plagas y enfermedades, para que el sistema no sólo sea utilizado en aguacate, sino en otros tipos de cosechables que sean producidos en el país.

Así mismo, integrar una base de datos de las fichas técnicas que ya existen sobre cada tipo de plaga y enfermedad, para que la aplicación de usuario final emita recomendaciones, y en caso deseado se redirija con alguna dependencia de la elección del interesado para la oportuna solución de problemas de este tipo.

## 4. Referencias

- [1] Martínez, María del Pilar. (2018). México principal productor de aguacate. *El economista*. Recuperado de <https://www.economista.com.mx/empresas/Mexico-principal-productor-de-aguacate-20180131-0111.html>.
- [2] Juárez, Axel. (2019). Cuánto guacamole se come en el super bowl. *Nota periodística*, El Universal.
- [3] L. V. Enrique, H. O. Marco, et. al, "Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Aguacate Mexicano", 2017, SAGARPA, pp. 2-9.
- [4] Vecino, Berbel, Julio. (1989). La inteligencia artificial en la agricultura: Perspectivas de los sistemas expertos. *Dialnet*
- [5] Jiménez, Adrés. Ravelo, Dianeth. Gómez, Johana. (2010), Sistema de adquisición, almacenamiento y análisis de información fenológica para el manejo de plagas y enfermedades de un duraznero mediante tecnologías de agricultura de precisión. Artículo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [6] Montoya Urtega, Javier. (2015). Intelligent System for plague control in crops. *REFI UPN*.
- [7] Galindo, F, Juan Carlos. (2017). Agricultura e inteligencia artificial serán inseparables. Muy interesante.
- [8] Berlanga, V., Rubio Hurtado, M. J., & Vilà Baños, R. (2013). Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. *REIRE. Revista d'Innovació i Recerca en Educació*, 2013, vol. 6, num. 1, p. 65-79.
- [9] Martínez, G. R. S., & Mejía, J. A. S. (2011). Árboles de decisiones en el diagnóstico de enfermedades cardiovasculares. *Scientia et Technica*, 16(49), 104-109.
- [10] Naranjo, M. G., & Reina, J. R. (1990). Inteligencia Artificial II. *Learning*, 5(3), 239-266.

## 5. Biografías

Marcos Emiliano López Pérez. Nace el 27 de agosto de 1995 en la Ciudad de México. Residente del municipio de Tlalmanalco Estado de México y estudiante de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, interesado en la Inteligencia Artificial gracias al curso del mismo nombre, impartida en el 7° semestre de la carrera de ingeniería en computación, de la cual está cursando el semestre correspondiente al ciclo 2020-1, siempre confiando que la ciencia e ingeniería son la herramienta para mejorar al mundo.

Luis Fernando Columna Álvarez. Residente de la alcaldía Iztapalapa Ciudad de México, nacido el 23 de febrero de 1995. Estudiante de la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, cursando los últimos semestres de la carrera ingeniería en computación, llevando el módulo de salida con especialidad en redes y seguridad. Interesado en seguir desarrollando habilidades y aptitudes que le permitan desenvolverse en cualquier campo de la ingeniería en computación.

Guadalupe Michelle Ojeda Pérez nació en la Ciudad de México el 29 de enero de 1995, actualmente se encuentra cursando la carrera de Ingeniería en Computación en la Facultad de ingeniería de la UNAM, su área de interés actualmente es la aplicación de los sistemas inteligentes para el desarrollo de nuevas aplicaciones, que ayuden en el desarrollo social, a futuro espera realizar más contribuciones en el área de sistemas inteligentes pero aplicados a la medicina y sobre todo realizar más publicaciones.

## “Proceso de manufactura aditiva de prótesis de extremidades superiores por medio de DFMA”.

T. M. Meneses<sup>1</sup>, Y. Gonzalez<sup>2</sup>, A. Bautista<sup>3</sup>, F. Orozco<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico Superior de Huichapan,  
Huichapan Hidalgo México, [tmmeneses@iteshu.edu.mx](mailto:tmmeneses@iteshu.edu.mx)

**Resumen**—El presente proyecto pretende desarrollar una metodología de manufactura aditiva para el desarrollo de prótesis de extremidades superiores como la mano, la prótesis funciona con el movimiento de la muñeca ya que llevará mecanismos y ligas para transmitir el movimiento, esa prótesis va enfocada para niños de alrededor de 5 años en adelante, adolescentes y adultos que hayan tenido una malformación en sus manos o que tuvieron un accidente perdiendo parte de su mano. La Manufactura aditiva es un proceso que se empieza a desarrollar en México y aprovechando sus características de ahorro de material, también se pretende que esta prótesis sea económica.

**Palabras clave** — manufactura, prótesis, extremidades, superiores, aditiva.

**Abstract**— The present project aims to develop an additive manufacturing methodology for the development of prostheses of upper extremities such as the hand, the prosthesis works with the movement of the wrist since it will carry mechanisms and links to transmit the movement, that prosthesis is focused for children around 5 years and older, adolescents and adults who have had a malformation on their hands or who had an accident losing part of their hand. Additive Manufacturing is a process that begins to develop in Mexico and taking advantage of its characteristics of material savings, it is also intended that this prosthesis is economical

**Keywords** - manufacturing, prosthesis, extremities, superior, additive.

### I. INTRODUCCIÓN

Las extremidades en un ser humano son de vital importancia para el desarrollo de actividades cotidianas como lo son el aprendizaje, la comunicación, la recreación y las actividades laborales. Siendo un instrumento de alta sensibilidad con el que a través del tacto ayuda a explorar y a trabajar conjuntamente con los demás sentidos, por lo que la pérdida de una extremidad es un episodio traumático para un ser humano, especialmente cuando este evento

ocurre en la población en general que tenga alguna malformación congénita y/o pérdida parcial de la mano.

Sin embargo, los elevados costos de las prótesis las hacen inaccesibles a las personas de bajos recursos económicos. Los costos de las prótesis actuales de miembros superiores dependen directamente de su estructura y tecnología, si la prótesis es de materiales poliméricos tiene un costo menor pero si la prótesis es electromecánica su valor aumenta.

Por lo anterior el presente proyecto de tesis pretende diseñar un proceso de fabricación para prótesis de extremidades superiores por medio de manufactura aditiva, ya que las tecnologías basadas en manufactura aditiva consumen sólo el material y la energía necesaria, lo que reduce el impacto ambiental y favorece el ahorro energético.

### Antecedentes

La investigación relacionada con el avance y el desarrollo en la biomecánica de la mano, las prótesis, los materiales bio compatibles y las prótesis cosméticas, ha venido mostrando un alto desarrollo.

Cada día se prefieren diseños de prótesis más parecidos a la mano humana, con una alta funcionalidad, peso reducido, y que no requieran energías exógenas para su movimiento y complicados sistemas de control, sino que se utilice la fuerza de las partes de la mano que aún se conserven. Los esfuerzos realizados por los investigadores en el desarrollo de nuevas prótesis de mano han generado impresionantes resultados como la obtención de modelos que cuentan con varios grados de libertad, y diseños que se asemejan cada vez más a la mano humana y conservan su tamaño. Se han desarrollado prótesis con una elevada funcionalidad como la mano Utah/MIT, la mano robótica de la NASA, la mano DLR y la mano Stanford/JPL. La mayoría de ellas fueron concebidas con fines de operación en el espacio y presentan el inconveniente de tener un elevado peso. Sin embargo, se han desarrollado prótesis más sencillas, con un diseño estructurado y ligero, como la mano de Southampton, la mano TB, la

mano de Italia, y la mano OTTOBOCK, las cuales se utilizan ampliamente en la prótesis del miembro superior.

Dentro de los primeros trabajos realizados en los cuales se potencian las prótesis no solo en su aspecto cosmético sino en su aspecto funcional, tanto mecánico como eléctrico, se encuentra la empresa escocesa con su producto ProDIGITS, quien provee soluciones en prótesis para distintos niveles de ausencia ya sea total o parcial.

En 1994 un nuevo diseño fue desarrollado por Prosthetics Research Group y el Bioengineering Centre, en Edinburg quienes resolvieron los problemas de talla y lo redujeron y simplificaron tanto en la manufactura y desarrollo de las prótesis como su control. El innovador diseño de 1994 fue llamado Prodigits (powered prosthetic digit system) y se basó en pequeños motores y cajas de engranajes acomodados dentro de espacios digitales de los dedos y el pulgar, con lo que se resolvió el problema de espacio y se aproximó el tamaño de las prótesis al de la mano de un niño de 2 años o un bebé.

En el año 2005, la búsqueda de nuevas tecnologías para el desarrollo de prótesis de mano, trae consigo una nueva invención que no utiliza dispositivos electrónicos para su funcionamiento. La nueva prótesis recibió el nombre de Xfinger, el cual es el primer dedo artificial diseñado específicamente para solucionar amputaciones parciales de dedo.

Cada una de estas prótesis se fabrica individualmente, para acomodarla a los diferentes casos de amputación. La prótesis se recubre luego por una piel sintética de silicona, emulando casi a la perfección, la funcionalidad y la precisión de un dedo real humano no amputado.

Cada una de las falanges de X-finger tiene articulaciones naturales, que se activan cuando el dedo residual se mueve.

Esto permite a los usuarios comenzar a utilizar la prótesis inmediatamente, como un acto reflejo. Aquellos que tengan más de un dedo amputado podrán utilizar varias prótesis y moverlas independientemente, al contrario de lo que sucede con muchos modelos en el mercado. La gran novedad de este diseño es su composición mecánica y sencilla que permite obviar sistemas de control y motores por cada grado de libertad. Es el mejor diseño de los revisados, y por esta razón es el modelo sobre el cual se basó el diseño de la prótesis.

#### *Marco Teórico*

La mano de Canterbury [1] utiliza eslabones mecánicos movidos directamente para actuar sobre los dedos de forma

similar a la mano humana. El movimiento directo de los eslabones se utiliza para reducir algunos problemas que presentan otros diseños de mano. Cada dedo de esta mano tiene 2.25 grados de libertad; la parte fraccionaria se debe al mecanismo compartido para extender los cuatro dedos. Los motores de corriente directa tienen una reducción por medio de engranajes con una relación de transmisión 16:1. Los dedos cuentan con sensores de presión en cada articulación y en su parte distal, lo que totaliza cuatro sensores de presión por cada dedo, dos motores de corriente directa y un sensor de efecto Hall. El pulgar tiene solo un motor y tres sensores de fuerza, mientras en la palma se encuentran los motores encargados de abrir y cerrar todos los dedos y de la rotación del pulgar; para un total de dos motores, dos encoders, dos sensores de efecto Hall y tres sensores de fuerza. Todo esto resulta en un total de 91 cables por lo que se requirió un sistema de control distribuido utilizando un PSoC de Semiconductores Cypress. Este microprocesador solo es capaz de controlar la posición y velocidad, mientras que el resto de la cinemática y demás comandos complejos se calculan por aparte en un PC.

El manipulador desarrollado en la Universidad de Reading, Inglaterra [1, 2], propone el uso de cables Bowden (Chicotes) dirigidos a cada unión como medio para hacer actuar los dedos. Este novedoso diseño simplifica el control de la mano al eliminar el acoplamiento entre juntas y permite la traslación directa y precisa entre las juntas y los motores que accionan los cables. La cinemática de los dedos se simula con mayor precisión al permitir dos grados de libertad con el mismo centro de rotación en el nudillo más grande de la mano. Esta mano incluye sensores en las últimas falanges de los dedos para acrecentar la precisión durante la sujeción. Otros desarrollos tecnológicos relevantes de prótesis de mano pueden ser encontrados en [12, 13, 14]. En todos ellos se aprecia un marcado empleo de sistemas mecatrónicos complejos, cuyo proceso de diseño, tecnologías de fabricación y materiales requeridos son altamente costosos. Además, es necesario resaltar el interés en emular, en apariencia y tipos de movimientos naturales de mayor frecuencia, con respecto a una mano real. Lo anterior genera la necesidad de contar con equipos de diseño multidisciplinarios que traten de manera concurrente todos los aspectos de desarrollo de las prótesis con una visión orientada a su ciclo de vida.

En este proyecto el objetivo consistió en diseñar y fabricar un prototipo de prótesis de mano para personas amputadas números de mano y muñeca, y a su vez evaluar qué tipo de señales,

micro eléctrico o por voz, resulta el más adecuado para su accionamiento [6]. El prototipo posee 10 GDL y un peso total de 1260 g [6]. El modelamiento antropométrico y dinámico se realizó empleando un sistema complejo de ecuaciones matriciales ligadas. Para la realización del modelo cinemático, se utilizó el planteamiento de Denavit/Hartenberg [7], al tiempo que se emplearon resultados obtenidos por otros investigadores [8, 9]. La tendencia a futuro será incrementar la investigación y desarrollo en nuevos materiales que posean un buen comportamiento en cuanto a respuesta, compatibilidad, resistencia y durabilidad. Lo cual, junto al empleo de sistemas de control y accionamientos más potentes, robustos y compactos, posibilitará un mayor acercamiento de las prótesis de mano hacia su equivalente natural desarrollado en la zona de la mano con el fin de apreciar los detalles estructurales. Se concluye en el proyecto, que para varias funciones de la prótesis resulta más adecuado el control por voz, aunque se detecta para esta estrategia mayor sensibilidad al ruido ambiental.

En estos prototipos se aprecia una clara evolución tanto a nivel del diseño y optimización de los sistemas mecánicos como en la implementación de dispositivos de control por medio de diferentes tipos de señales. La mano humana posee una compleja organización anatómica y funcional, lo cual facilita un gran número de posibilidades en las posiciones, movimientos y manipulación de objetos. Desde el punto de vista biomecánico, la mano humana puede ser considerada como un sistema de eslabones de segmentos óseos interconectados mediante pares cinemáticos articulados formados por ligamentos; mientras que un complejo sistema de actuadores formados por músculos y tendones, la mayoría de los cuales posee conexión poli articular, garantizan el más alto nivel de multifuncionalidad y destreza alcanzable en el sistema musculo esquelético. Para implementar y emular satisfactoriamente esta abundante riqueza funcional de la mano humana es necesario contar con modelos no solamente cinemáticos y cinéticos, sino también reo lógicos que describan con suficiente agudeza el comportamiento de los materiales bioingenieriles que ejecutan fundamentalmente la función de actuadores en las prótesis de mano.

Los progresos recientes en el desarrollo de prótesis automáticas se deben principalmente a la incorporación de la física y la matemática, tanto a nivel de la descripción del movimiento de la mano como en el análisis de las señales micro eléctricas. La cinemática y la cinética permiten, por medio de la teoría Newtoniana, encontrar una

descripción suficientemente precisa del comportamiento de la mano humana, tanto desde el punto de vista de la geometría del movimiento como de la generación y aplicación de la fuerza a través de los músculos, tendones y estructura ósea que conforma la mano. Por otra parte, la transformada de Fourier se ha convertido en la principal herramienta para descifrar, interpretar y reproducir de forma aproximada las señales que por medio de impulsos electroquímicos generan los movimientos de la mano, a través de la red nerviosa y los músculos [10].

Existen algunos modelos derivados de la teoría visco elástica que permiten describir el comportamiento de los músculos de la mano en las acciones de contracción y relajamiento [11, 12, 13]. Estos modelos corresponden a emulaciones con sistemas masa-resorte-amortiguador, y representan el comportamiento ya mencionado comparándolo con el comportamiento de un sólido o de un fluido sometido a carga [10]. La descripción utilizada que aproxima el funcionamiento del músculo al de un fluido se denomina “Modelo viscoelástico de fluido de Maxwell” [14, 15, 16] ya que fue precisamente James Clerk Maxwell quien lo propuso, mientras el que aproxima el mismo comportamiento al de un sólido sometido a la acción de una carga se denomina “Modelo viscoelástico de sólido de Voigt” [17, 18], siendo propuesto por el físico alemán Woldemar Voigt.

En la actualidad el término inteligente se utiliza como una definición para calificar y describir una serie de materiales que presentan la capacidad de cambiar sus propiedades físicas (rigidez, viscosidad, forma, color, etc.) en presencia de un estímulo concreto. Para controlar dicha respuesta de una forma predeterminada, se diseñan mecanismos de control y selección. El tiempo de respuesta es corto y el sistema comienza a regresar a su estado inicial tan pronto como el estímulo cesa [19].

Los alambres musculares, delgados y de alta resistencia mecánica, son elaborados con aleaciones de Níquel y Titanio llamadas “Nitinol”, la cual es una de las aleaciones con memoria más utilizadas. Uno de los aspectos críticos durante la fase de diseño de una prótesis de mano es el relacionado con la selección de los actuadores y en esta dirección los alambres musculares han mostrado una gran complementariedad con estos últimos [20].

En la década del 2000, el término de fabricación aditiva fue consolidándose conforme los métodos de fabricación alcanzaron su madurez, haciendo evidente que en el caso de los metales no podría limitarse al uso de métodos de desbaste. En este sentido, el control numérico

debería de tener un alcance mayor que este tipo de métodos, de esta forma, se conceptualizó el término de manufactura sustractiva; sin embargo, el término de manufactura aditiva parecía residir solamente en el campo de los polímeros.

En 2010, los términos de impresión 3D y manufactura aditiva comenzaron a convertirse en sinónimos, lo que refleja la noción de similitud respecto al tipo de trabajo empleando los diversos materiales bajo la premisa de fabricar por adición de capas y control automatizado.

El término de impresión 3D ha tenido una mayor proliferación para la comercialización, y se define como un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material.

En términos generales, las impresoras personales 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, ofreciendo a los desarrolladores de producto, la capacidad para imprimir partes y montajes de diferentes materiales con diversas propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de montaje.

Asimismo, en los últimos años se han desarrollado otros conceptos como la Manufactura de Escritorio, siendo este término un sinónimo de las impresoras personales 3D, debido a la alta proliferación de impresoras pequeñas para usos personales; o conceptos como Manufactura Rápida, derivado del término de Prototipado Rápido, empleado en las primeras etapas de desarrollo de un producto, y el concepto de Manufactura por Demanda, relacionado con un concepto de fabricación en menores cantidades conforme a requerimientos y especificaciones del cliente.

A partir de 2010, se empieza a consolidar el concepto de Manufactura Aditiva, derivado de los avances en el diseño y fabricación de piezas industriales metálicas, por ejemplo engranes y bisagras, generados a partir de la deposición de materiales.[ 21 ].

#### *Estado Actual*

La tecnología de la impresión 3D existe desde hace aproximadamente 30 años, pero se ha difundido ampliamente en los últimos cinco años por diferentes causas:

- La disponibilidad de nuevos materiales con mayores funcionalidades.
- El vencimiento de las patentes que protegían algunas tecnologías de fabricación aditiva, permitiendo así la entrada al mercado de empresas dedicadas a la fabricación y

comercialización de impresoras personales económicamente accesibles.

- Los amplios esfuerzos de mercadotecnia de empresas líderes a nivel global, especialmente para la comercialización de impresoras personales en 3D.

- Las diversas aplicaciones de las tecnologías de fabricación aditiva y la difusión de las mismas a través de Internet.

- La diversidad de nuevos materiales que pueden trabajar las impresoras 3D (más de 200), desde productos orgánicos (ceras, células, tejidos, alimentos, entre otros,) hasta metales (aluminio, titanio, acero inoxidable, entre otros), pasando por materiales cerámicos (grafito, zirconio, entre otros) y polímeros (ABS, poliamida, policarbonato, entre otros).

- Las diferentes combinaciones de materiales lo que permite obtener diferentes características de las piezas, por ejemplo, la fabricación de un objeto con partes rígidas y blandas.

- La producción de componentes funcionales con mecanismos complejos, baterías, transistores o LED. [ 21].

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### *Metodología*

Las referencias deben listarse al final del artículo. Hoy en día, para mejorar la rentabilidad de nuevos diseños de productos se puede contar con dos estrategias básicas:

La innovación en producto (funciones y prestaciones), o el DFMA (Design for Manufacturing and Assembly).

La innovación se caracteriza por proporcionar rentabilidades muy grandes bajo riesgos importantes, al contrario de lo que ocurre con el DFMA, que proporciona rentabilidades inferiores con un bajo riesgo, retornándose rápidamente el dinero invertido en el proyecto. Aplicando las técnicas y las metodologías DFMA al diseño de un producto, es posible recortar sus costes de fabricación hasta incluso un 30 ó un 40%.

El DFMA cuyo significado es “Design for Manufacturing and Assembly” – “Diseño para la Fabricación y el Montaje”, consiste en un conjunto de técnicas y metodologías para la mejora del diseño, o rediseño, de un producto y tienen como objetivo principal mejorar los aspectos de fabricabilidad, montabilidad y costes, respetando las funciones esenciales del producto.

El DFMA se engloba dentro de la Ingeniería Concurrente (también denominada en la literatura especializada ingeniería simultánea, diseño total o diseño integrado) como un enfoque

concreto orientado a la fabricación y el montaje. Por medio del DFMA se concibe la ingeniería de diseño y desarrollo de productos y servicios de forma global e integrada donde concurren los siguientes puntos de vista:

**Producto:** tiene en cuenta tanto la gama que se fabrica como los requerimientos de las distintas etapas del ciclo de vida, los costos o recursos asociados (función, fabricación, montaje, calidad,...).

**Recursos humanos:** se trabaja en equipos pluridisciplinarios donde colaboran profesionales que actúan de forma colectiva en tareas de asesoramiento y de decisión o de forma individual en tareas de impulsión y gestiones, tanto pertenecientes a la empresa como externas a ella (otras empresas, universidades, centros tecnológicos).

**Recursos materiales:** Concurrer nuevas herramientas basadas en tecnologías de la información y la comunicación, cada vez más integradas (modelización 3D, herramientas de simulación y cálculo, prototipos y útiles rápidos, comunicación interior, Internet).

#### *Implementación de la Metodología*

**Definición del equipo de trabajo:** se conformó el equipo de trabajo con docentes que tienen experiencia en diseño y simulación con el software Solidworks, así mismo se consideraron alumnos de los últimos semestres para que reforzar estos conocimientos antes de que se gradúen y salgan a la vida laboral.

**Definición del producto:** la prótesis funciona de forma mecánica con unos resortes y el movimiento de la muñeca accione el mecanismo de los dedos así mismo es personalizada al 100%, se tomaron medidas antropométricas y ergonómicas de las personas que necesitan la prótesis, y con apoyo de un médico ortopedista generar una prótesis con un amplio confort, se tendrá una biblioteca virtual de los diferentes diseño de las prótesis para poder modificar las medidas de muñeca antebrazo o si la persona tiene algunos dedos también se puede modificar la prótesis, el ciclo de vida que pretende tener la prótesis es de 5 años, en ese lapso se le dará servicio de mantenimiento y de refacciones.

Se utilizara la impresión 3D con material ABS ya que es uno de los materiales que se pueden utilizar por sus resistencia y muy fácil para imprimir la prótesis, el mercado al que se enfoca la venta de la prótesis es de médicos ortopédicos para mejorar la adaptabilidad para la persona, la venta se pretende que sea por medio de comercio electrónico.

**Diseño conceptual, materialización y detalle del producto:** el diseño conceptual de la prótesis

se desarrolló en el software Solidworks ya que tiene la capacidad de poder simular los movimientos, las fuerzas a la cuales estará expuesta la prótesis, la materialización y detalle de la prótesis se puede visualizar con los modelos y diseños que se desarrollan en Solidworks.

**Fabricación:** este punto como se ha mencionado anteriormente se utilizó una impresora 3D Stratasys 1200 St, con material ABS, previamente el diseño que se realizó en Solidworks se codifica para que la impresora genera las capas de material de aporte y material de soporte para que el modelo de la prótesis se imprima, en la siguiente figura 1 se muestra la impresión de la prótesis.



### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se observa ya el resultado de la prótesis después de haber concluido el análisis con la metodología DFMA, cabe mencionar que la prótesis requiere de un acabado ya sea por medio de lijado, baños con acetona así como de pintura, teniendo en cuenta que la persona puede ser alérgica al material que utilizamos como es el polímero ABS, debemos de revisar los mecanismo de la prótesis para que siempre se mantengan en buen funcionamiento ya que se requiere ajustar la tensión de las ligas que controlan el movimiento de las articulaciones de la prótesis en la figura 2 y 3 se muestra la prótesis impresa en 3D.

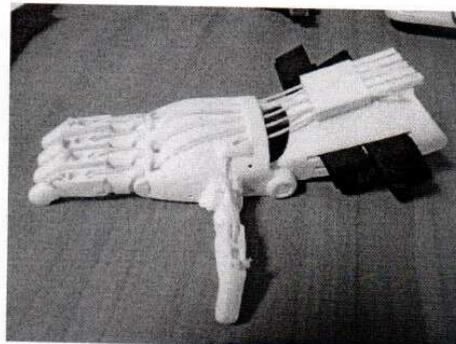




Fig. 3 Prótesis impresa en 3D

#### IV. CONCLUSIONES

Aplicando la metodología DFMA no ayuda para que la prótesis sea un producto con alta calidad, que sea 100% personalizada, para la persona que la requiera, podemos determinar las variables que nos pueden afectar en el desarrollo de la prótesis utilizando un software como Solidworks desde su materialización y simulación de sus componentes. También se pueden mejorar los acabados de la impresión 3D, por medio de lijado, baños en acetona, si como de pintura en diferentes colores.

#### REFERENCIAS

- [1] Dunlop, G R.A distributed controller for the Canterbury hand. Professional Engineering Publishing, International Conference on Mechatronics. ICOM, London,2003J. Breckling, Ed., *The Analysis of Directional Time Series: Applications to Wind Speed and Direction*, ser. Lecture Notes in Statistics. Berlin, Germany: Springer, 1989, vol. 61.
- [2] Harris, M, y Kyberd, P., Desing and development of a dextrous manipulator, Professional Engineering.
- [3] BIONICS., TOUCH.Touch Bionics. [En línea] Julio de 2004. [www.Touchbiomechanics.com](http://www.Touchbiomechanics.com).2004.
- [4] Ottobock. [www.ottobock.com.co](http://www.ottobock.com.co). [En línea] Septiembre de 2009. [Citado el: 14 de Septiembre de 2010.], <http://www.ottobock.com.co>.2010 M. Shell. (2002) IEEEtran homepage on CTAN. [Online]. Available: <http://www.ctan.org/tex-archive/macros/latex/contrib/supported/IEEEtran/>
- [5] *Touchbionics*.[www.touchbionics.com](http://www.touchbionics.com). [En línea] Julio de 2008. [Citado el: 14 de Septiembre de 2010.] <http://www.touchbionics.com>.2010
- [6] Sarmiento, L. C. y Tovar A. Prótesis de mano para personas amputadas de mano y muñeca., Facultad de

- Ingeniería. Programa de Maestría en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2007.
- [7] Craig, J. Robótica, Pearson, Mexico, 2006.
- [8] Kapandji, A Fisiología Articular. Tomo 1. Panamericana, Paris, 1998.
- [9] [9] Nordin, M. y Frankel, Biomécanica básica del sistema músculo esquelético, McGraw Hil, Madrid, 1994.
- [10] Freivalds, A., Biomechanics of the upper limbs. pp. 101-187, CRC press, Boca Ratón, 2004.
- [11] Flügge, W. Viscoelasticity. Blaisdell, publishing Company, Stanfor, 1976.
- [12] Cristensen, R, M, Theory of viscoelasticity. Dover publication inc., New York, 2003.
- [13] Balart, G.R., Modelo de Kelvin-Voigt de Comportamiento Viscoelástico. Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, 2008.
- [14] Yanez, G., Murillo, J. y Tejeiro, J., Estudio del comportamiento de un fluido viscoelástico utilizando el modelo de Maxwell, Revista Colombiana de Física, pp. 1014-1017, 2006.
- [15] Plaza, H. Propiedades viscoelásticas de materiales poliméricos. Universidad de Chile, Santiago de Chile, 2002.
- [16] [Del Rio, J. y Castrejon, R. Modelo simple para la permeabilidad de un fluido viscoelástico. Revista Mexicana de Física, 2003.
- [17] Jauregui, J, C., Urbiola, L. y Diaz, C. Modelado Multidimensional de sistemas viscoelásticos. Ingeniería Mecánica; Tecnología y Desarrollo, pp. 6-12, 2005.
- [18] [Hilton, H., Generalizaed Viscoelastic, 1-DOF, en tareas de asesoramiento y de decisión o de forma individual en tareas de impulsión y gestiones, tanto pertenecientes a la empresa como externas a ella (otras empresas, universidades, centros tecnológicos). Recursos materiales: Concurren nuevas herramientas basadas en tecnologías de la información y la comunicación, cada vez más integradas (modelización 3D, herramientas de simulación y cálculo, prototipos y útiles rápidos, comunicación interior, Internet). Deterministic Nonlinear Oscillators. Journal of Non-Linear Mechanics, pp. 1-22, 1999.
- [19] Rios-Louth, D., Uso de materiales con memoria como actuadores en los dedos de una prótesis de miembro superior. Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica, Queretaro, 2004.
- [20] Gilberson, R., Muscle Wires: Project Book. Mondo Tronics, San Francisco, California, 2000.
- [21] Secretaría de Economía, Cancintra. Diagnostico para el desarrollo de procesos de fabricación de manufactura aditiva 2016

# Implementación de un modelo computacional para estimar el porcentaje de porosidad en materiales sólidos

M.R. Ortiz-Alvarez<sup>1, a</sup>, S. Polanco-Martagón<sup>1, b</sup>, E. Rocha-Rangel<sup>1, c</sup>, J.A. Rodríguez-García<sup>1, d</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de Victoria

<sup>a</sup> raquel.tyemelane@gmail.com, <sup>b</sup> spolanco@upv.edu.mx, <sup>c</sup> erochar@upv.edu.mx, <sup>d</sup> jrodriguez@upv.edu.mx

**Resumen**— En este trabajo se reporta la aplicación de un modelo computacional al campo de la ciencia de materiales para la estimación de porosidad de materiales sólidos, mediante el estudio de imágenes de microscopía óptica (MO) de las superficies de muestra de aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) y del latón 7030. El modelo se apoya en técnicas de procesamiento digital de imágenes y la aplicación del algoritmo de agrupación k-means para estimar el porcentaje de porosidad. Se muestra el resultado obtenido al evaluar la muestra del latón 7030, con el modelo computacional es de 16.55% de porosidad, el resultado de esta muestra por parte del experto fue de 16% con el método experimental y 16.82% con el método analítico, al comparar los resultados la diferencia es de 0.55% con el experimental y de 0.27% con el analítico, por lo tanto, el modelo computacional tiene un mejor porcentaje de acierto.

*Palabras clave.* Imágenes de microscopía óptica, algoritmos de agrupamiento, materiales sólidos, porosidad.

## 1. Introducción

El estudio de la porosidad de las muestras sólidas es de gran importancia ya que interactúa con las propiedades físicas y químicas de estos materiales. La porosidad influye en las interacciones físicas y la reactividad química de los sólidos con gases y líquidos para muchas aplicaciones industriales [1]. Algunos ejemplos de materiales porosos de importancia industrial incluyen cerámicos, materiales de construcción reemplazos en odontología y ortopedia, encapsular células o tejidos, polímeros termoplásticos, aceros inoxidables, turbinas, entre otros [2-6].

Para estudiar la porosidad, se emplean diferentes técnicas de caracterización como son: microscopía óptica, el método de Arquímedes, la dispersión de rayos X, la intrusión de líquidos, entre otros; también de softwares que se adquieren cuando se compran los microscopios o descargan software libre como ImageJ [1-7]. Sin embargo, estas técnicas dependen en gran medida de la experiencia del experto, en caso del software a veces no se cuenta con él; en caso del software libre es para otro tipo de estudio y el experto lo utiliza para estudiar la porosidad.

En el área de la computación, el estudio de la porosidad es un tema abierto, en donde algunos investigadores han desarrollado herramientas computacionales, como es el caso del investigador Zohdi T.I. [8] que fue el primero en proponer Algoritmos Genéticos (AG) para materiales compuestos. Años después

Carranza y colaboradores [9] desarrollaron una herramienta numérica computacional para el diseño de microestructuras de espumas, el cual está en función a los poros. En el año 2015, Espinosa y colaboradores [10] presentaron un método de segmentación de poros, rayos y fibras de imágenes microscópicas de madera, utilizando algoritmos de agrupamiento y de contorno, entre otros. Sin embargo, el estudio de la porosidad en materiales sólidos mediante algoritmos computacionales sigue siendo un tema abierto a investigación. Es por eso que el objetivo de este trabajo es presentar la implementación de un modelo computacional basado en el algoritmo de k-means para la estimación del porcentaje de porosidad de imágenes de microscopía de diferentes zonas de muestras de materiales sólidos.

## 2. Parte técnica del artículo

### A. Obtener imágenes de microscopía

Para este trabajo se obtuvo una muestra de aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) procesada por técnicas de polvos y una de latón 7030 (aleación de cobre y zinc), procesada por el método tradicional de fundición, de las cuales se obtuvieron varias imágenes microscópicas de diferentes zonas de las muestras mencionadas al inicio, con ayuda del microscopio óptico, es decir, de la muestra de aluminato de calcio se obtuvieron 25 imágenes con un lente de 50x y del latón se obtuvieron 30 imágenes, 15 imágenes con un lente de 10x y las otras 15 imágenes con un lente de 20x.

### B. Medir manualmente el porcentaje de porosidad

Para medir la porosidad, el experto realiza dos tipos de mediciones: de manera experimental y de manera analítica. En la medición experimental aplica el método de Arquímedes y en la medición analítica aplica el método de la maya o también conocido como la fracción volumétrica de fase.

#### B.A. Método de Arquímedes

El método de Arquímedes o principio de Arquímedes (ver Fig. 1) consiste en sumergir la muestra total o parcialmente en un fluido en reposo (generalmente agua), el cual experimenta un

empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado [11,12]. Las fórmulas que aplican son la (1) y (2).

Formula de la densidad aparente:

$$Q_{ap} = (w_s * Q_{agua}) / (w_s - w_i) \quad (1)$$

$w_s$  = Peso en seco intermedio

$w_i$  = Peso sumergido en agua

$Q_{agua}$  = Densidad del agua con base a la temperatura

Formula de la densidad real:

$$\% Q_{real} = (Q_{ap} * 100) / Q_{material} \quad (2)$$

$Q_{ap}$  = Densidad aparente

$Q_{material}$  = Densidad del material

El resultado obtenido se le resta el 100% y lo que arroje es el porcentaje de porosidad.

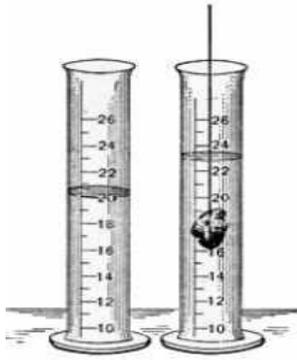


Fig. 1. Método de Arquímedes

### B.B. Método de medición de la fracción volumétrica

El método de medición de la fracción volumétrica que se ocupa el método de punto-cuenta, que consiste en poner una maya o rejilla de puntos sobre la imagen de microscopía (ver Fig. 2), la fracción del área parcial de la fase  $\beta$  ( $A_\beta$ ), puede ser estimada por medio de la proporción de puntos ( $P_P$ ) de la maya o rejilla que hacen contacto con la fase de estudio [13,14]. Las fórmulas para determinar la fracción volumétrica son la (3) y (4).

$$P_P = \left( \frac{P_\beta}{P_T} \right) * 100 \quad (3)$$

$$P_P = V_V \quad (4)$$

Dónde:  $P_\beta$  = Total de puntos sobre la fase  $\beta$ .

$P_T$  = Total de puntos en la maya o rejilla.

$P_P$  = Proporción de puntos de la fase  $\beta$ .

$V_V$  = Fracción volumétrica.

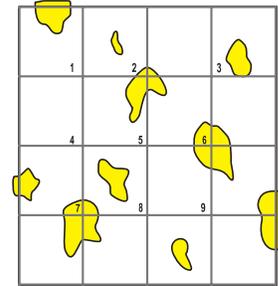


Fig. 2. Sección plana con una red de puntos [15].

### B.C. Estimación la porosidad mediante el algoritmo k-means

Para estimar el porcentaje de porosidad se ocupa la técnica de agrupación en clústeres, para dividir las imágenes en segmentos. El algoritmo de agrupación es k-means, su objetivo es agrupar K grupos basándose en sus características, para el agrupamiento se realiza la suma de distancias entre cada objeto y el centroide de su grupo, es decir, se asignan los puntos a los grupos que está más cerca de ellos [16]. El algoritmo de k-means queda de la siguiente manera:

K-MEANS ( $\{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N\}, K$ )

1.  $(\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_K) \leftarrow$  seleccionar semillas aleatorias ( $\{\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_N\}, K$ )
2. **Para**  $k \leftarrow 1$  hasta  $K$
3. **Hacer**  $\vec{\mu}_k \leftarrow \vec{s}_k$
4. **Mientras** no se cumpla el criterio de parada
5. **Hacer Para**  $k \leftarrow 1$  hasta  $K$
6. **Hacer**  $w_k \leftarrow \{ \}$
7. **Para**  $n \leftarrow 1$  hasta  $N$
8. **Hacer**  $j \leftarrow \arg \min_j, |\vec{\mu}_j - \vec{x}_n|$
9.  $w_j \leftarrow w_j \cup \{\vec{x}_n\}$  (reasignación de vectores)
10. **Para**  $k \leftarrow 1$  hasta  $K$
11. **Hacer**  $\vec{\mu}_k \leftarrow \frac{1}{|w_k|} \sum_{\vec{x} \in w_k} \vec{x}$  (recalcular los centroides)
12. **Retorna**  $\{\vec{\mu}_1, \dots, \vec{\mu}_K\}$

Para implementar k-means, ocupamos imágenes de tres dimensiones, las cuales se van a convertir matrices bidimensionales (longitud\*ancho, canales), después se aplica el algoritmo de k-means, el cual devuelve los centros del clúster y la etiqueta para cada píxel, enseguida se devuelve los grupos a su forma original, es decir, a imágenes tridimensionales y se trazan los resultados. El algoritmo se va a repetir con todas las imágenes que se hayan tomado de la muestra y los resultados se guardan en un arreglo para después promediarlo y así tener una mejor exactitud en la estimación del porcentaje de porosidad.

### C. Resultados

Los resultados que se obtuvieron de la muestra de aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ) con el método experimental fue de 28.16% y con el método analítico fue de 20.26%, en este método las imágenes solamente fueron tomadas por un solo tipo de lente, dado que el material está formado por polvos sinterizados. En la muestra del latón 7030, con el método experimental fue de 16% y con el método analítico se obtuvieron dos resultados dependiente de la magnificación empleada, debido que es un material fundido, el primer resultado es de 16.82% con un lente de 20x y el segundo es de 12.57% con un lente de 10x, estos resultados se pueden ver en la Tabla 1.

TABLA I. MEDICIONES MANUALES DE POROSIDAD

Nombre del Material	$\text{CaAl}_2\text{O}_4$	Latón 7030
Met. Experimental	28.16%	16%
Met. Analítico 50x	20.26%	X
Met. Analítico 20x	X	16.82%
Met. Analítico 10x	X	12.57%

Para los resultados obtenidos de la muestra de aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ), de las imágenes obtenidas con el microscopio óptico, se evaluaron el 60% de estas, y el resto de las imágenes se tomaron para hacer pruebas con el modelo, de igual manera se utilizaron estos porcentajes para la muestra del latón 7030. Los resultados se pueden observar en Tabla 2.

TABLA II. RESULTADOS DE POROSIDAD CON EL MODELO COMPUTACIONAL

Nombre del Material	$\text{CaAl}_2\text{O}_4$	Latón 7030
Imágenes con lente de 50x	26.13%	X
Imágenes con lente de 20x	X	16.55%
Imágenes con lente de 10x	X	15.54%

Al comparar los resultados entre el modelo computacional y los métodos tradicionales, se puede observar en la Tabla III que en el caso de aluminato de calcio que es un material con base en polvos, los métodos tradicionales tienen mayor variación, dado

que la muestra conforme a su uso se va desmoronando y al aplicar el método experimental varia el resultado cuando se tomó la imagen óptica para la fracción volumétrica; en la fracción volumétrica hay cierto grado de error porque solo se cuentan los puntos que coincidan con la rejilla omitiendo las demás zonas de importancia, mientras que con el modelo computacional tiene una mayor exactitud dado que contempla todas las zonas de porosidad, como se puede observar en las Fig. 3 son algunas imágenes del 60% que fueron evaluadas.

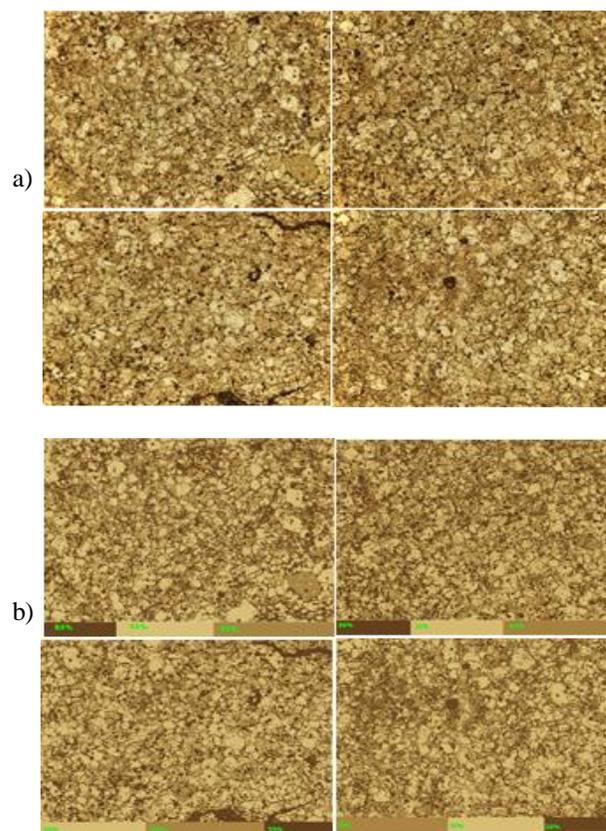


Fig. 3. Algunas imágenes de aluminato de calcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4$ ), en el inciso a) son algunas imágenes de microscopía de la muestra con un lente de 50x, en el inciso b) son las imágenes procesadas con el modelo computacional y su resultado de porosidad en ellas.

En el caso del latón 7030 que es una muestra de aleación, los métodos tradicionales varían muy poco dependiendo el tipo de lente, como se observa en la Tabla III, en la fracción volumétrica con el tipo de lente de 20x es de 16.82% y la fracción volumétrica con el tipo de lente de 10x es de 12.57%, lo que da una diferencia entre las fracciones volumétricas de 4.25%, mientras que con el modelo computacional la diferencia entre tipos de lentes es de 1.01%, como se puede observar en la Fig. 4 son algunas imágenes

del 60% que fueron evaluadas con el lente de 20x, en la Fig.5 son algunas imágenes con el lente 10x.

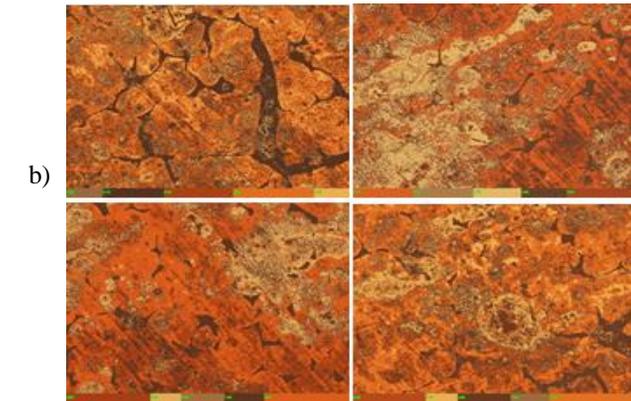
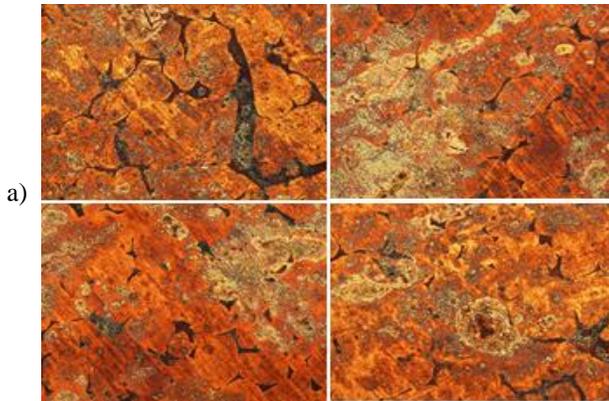


Fig. 4. Algunas imágenes del latón 7030, en el inciso a) son algunas imágenes de microscopia de la muestra con un lente de 20x, en el inciso b) son las imágenes procesadas con el modelo computacional y su resultado de porosidad en ellas.

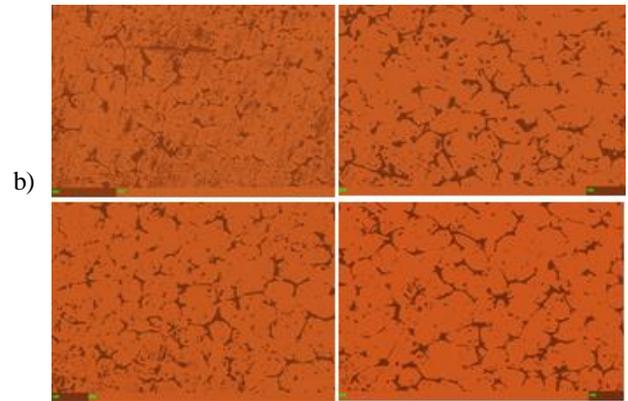
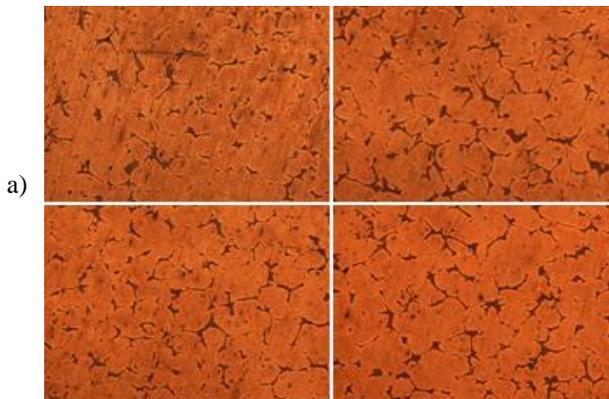


Fig. 5. Algunas imágenes del latón 7030, en el inciso a) son algunas imágenes de microscopia de la muestra con un lente de 10x, en el inciso b) son las imágenes procesadas con el modelo computacional y su resultado de porosidad en ellas.

TABLA III. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Nombre del Material	Met. Exp.	Met. Ana.	Mod. Comp.
CaAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> lente 50x	28.16%	20.26%	26.13%
Latón 7030 lente 20x	16%	16.82%	16.55%
Latón 7030 lente 10x	16%	12.57%	15.54%

### 3. Conclusiones

Con base en los resultados mencionados anteriormente se puede concluir que los métodos tradicionales cuentan con un cierto grado de error por diferentes circunstancias, de las cuales sobresale el tipo de material. En las imágenes de microscopia tanto para aplicar el método analítico como para el modelo computacional, el tipo de lente también cuenta mucho.

También se puede concluir que el modelo computacional tiene una mayor exactitud para estimar el porcentaje de porosidad de las muestras sólidas, dado que agrupa toda la porosidad de la imagen de microscopia. Además, se evalúa no solo una imagen de la muestra, sino varias imágenes de esta y se saca el promedio, para tener mayor exactitud.

Para trabajos futuros es generar un dataset con imágenes de microscopia, para después aplicar otras técnicas de aprendizaje automático.

### 4. Referencias

- [1] Espinal, L. (2002). Porosity and its measurement. *Characterization of Materials*, 1-10.
- [2] Miranda-Hernandez, J. G., Ortega-Aviles, M., Herrera-Hernandez, H., Gonzalez-Moran, C. O., Garcia-Pacheco, G., & Rocha-Rangel, E. (2018).

Refractory ceramics synthesis by solid-state reaction between CaCO<sub>3</sub> (mollusk shell) and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. *Ceramics-Silikaty*, 62(4), 355-363.

- [3] Romero-Plaz, M. D. R., Liscano-Durán, S. M., Palomo Hernández, A., & Padilla-Marín, P. (2014). Morphological characterization of ceramic powders for thermal sprayed coatings manufacture. *Iteckne*, 11(1), 93-98.
- [4] Triviño-Bolaños, D. F., Camargo-Amado, R. J., Muñoz-Saldaña, J., & Giraldo-Betancur, A. L. (2018). Estructuras Porosas de TiO<sub>2</sub>-Na<sub>0.8</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>8</sub>-Na<sub>2</sub>Ti<sub>6</sub>O<sub>13</sub>: Propiedades Superficiales y Evaluación Citotóxica. *Información tecnológica*, 29(6), 95-102.
- [5] Padilla, R. L., Lucci, R., & Oldani, C. (2018). Titanium structures with porosity gradient-space holder manufacturing and characterization. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(2).
- [6] Tobón, L., Barrios, C., Zambrano, D., & Toro, A. (2014). Análisis morfológico de la porosidad de un sistema de barrera térmica sometido a cargas térmicas constantes. *Revista Colombiana de Materiales*, (5), 35-41.
- [7] Campos, R., Martínez, J., Barrios, I., & Fusi, N. (2014). Morfología del espacio de poros de las areniscas de Utrillas a partir de imágenes de microtomografía axial computada de Rayos-X.
- [8] Zohdi T.I. "Analysis and Design of Microheterogeneous Composite Materials". CISM Course Notes, International Centre for Mechanical Sciences, Udine, Italy, 2001
- [9] Carranza, A. R., Dondero, M., & Cisilino, A. (2007). Implementación paralela de un algoritmo genético para optimizar el diseño de la microestructura de materiales con propiedades termicas función de la posición. *Mecánica Computacional*, 26, 1811-1823.
- [10] Espinosa, L. F., Herrera, R. J., & Polanco-Tapia, C. (2015). Segmentation of anatomical elements in wood microscopic images using artificial vision techniques. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 17(4), 735-748.
- [11] Bierman, J., & Kincanon, E. (2003). Reconsidering Archimedes' Principle. *The Physics Teacher*, 41(6), 340-344.
- [12] Falco, J., Franceschelli, I., & Marco, M. (2001). Método de Arquímedes para determinar densidades. *Universidad de San Andrés*, 4-5.
- [13] Sáez Almazán, I. (2015). *Diseño de un nuevo carburo cementado de matriz base Cr-Fe* (Master's thesis).
- [14] Velandia, M. (2008). Metalografía Cuantitativa. *Centro de Investigación en Materiales (CIMAT), CITEG, Editor Universidad Nacional Experimental de Guayana, Puerto Ordaz, Venezuela*.
- [15] Cambronero, C. G., & Moreno, I. G. (2006). Algoritmos de aprendizaje: knn & kmeans. *Inteligencia en Redes de Comunicación, Universidad Carlos III de Madrid*.

## 5. Biografías

**Maria Raquel Ortiz Alvarez**, nació en la Ciudad de Puebla, Puebla en 1985, recibió un BSc. Licenciado en Informática en el Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México en el 2008. Actualmente se encuentra la Maestría en Ingeniería en la Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, desde 2018, sus principales áreas de interés es visión por computadora y aprendizaje automático.

**Said Polanco-Martagón**, recibió un BSc. Licenciado en Ciencias de la Computación en el Instituto Tecnológico de Puebla, Puebla, México, en 2006. Obtuvo su maestría con honores, en el área de Tecnologías de la Información del Instituto de Tecnología de Puebla, Puebla, México en el año de 2010. Recibió el grado de Doctor en Ciencias Computacionales en julio de 2015 en el del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, México. Actualmente trabaja como profesor e investigador en la Universidad Politécnica de Victoria, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Sus principales áreas de interés son las redes neuronales artificiales, aprendizaje automático, algoritmos bioinspirados y Super-cómputo. Ha publicado unos ocho artículos en capítulos de libros, revistas y conferencias. ORCID: pago0001-8473-0534

**Enrique Rocha-Rangel** nació en la Ciudad de México, México en 1968. Recibió el B.S. y M.S. títulos en ingeniería metalúrgica del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México en 1991 y el PhD. Licenciado en metalurgia y materiales de la misma institución en 1999. Ha realizado estancias de

investigación en el Laboratorio de Control de Función de Materiales en la Universidad de Tecnología de Toyohashi, Japón, en 1998 y 2018. También realizó un posdoctorado en el Grupo de Propiedades Mecánicas y Mecánica de los Laboratorios Nacionales de Oak Ridge, USA. De 1992 a 2008, fue asistente de investigación en el Laboratorio de Ciencia de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México, México. De 2008 a 2009, fue asistente de investigación en el Departamento de Metalurgia y Materiales del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México. Desde 2009 es investigador principal del Departamento de Materiales Avanzados de la Universidad Politécnica de Victoria, ciudad de Victoria, Tamaulipas, México. Es autor de tres libros, más de 120 artículos. Sus intereses de investigación incluyen síntesis, procesamiento y caracterización de materiales. Posee cuatro patentes.

**José Amparo Rodríguez García**, Realizó estudio de Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Ciudad Victoria. Realizó estudios de posgrado en el CINVESTAV Unidad Saltillo, Coahuila, México obteniendo el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Metalurgia y Doctor en Ciencias con especialidad en Metalurgia y Cerámica. Se ha desempeñado como Profesor Investigador en la Universidad Politécnica de Victoria, desde el 2010 ha la fecha. Ha participado en diversos Congresos Nacionales e Internacionales y publicado artículos relativos a temáticas relacionadas con la síntesis y caracterización de materiales avanzados.

# Control de carga de baterías para una plataforma robótica móvil aplicando lógica difusa.

R. Vazquez<sup>1,a</sup>, I. Herrera<sup>1,b</sup>, G. Aguila<sup>1,c</sup>, O. Sandoval<sup>1,d</sup>, A. Martínez<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba, Departamento de Maestría en Ingeniería Electrónica

<sup>a</sup> robertomvt.94@gmail.com, <sup>b</sup> nacho.tec.orizaba@gmail.com, <sup>c</sup> gerardo\_aguila@yahoo.com.mx, <sup>d</sup> o.sandovalgonzalez@gmail.com, <sup>e</sup> albino3\_mx@hotmail.com

**Resumen**— El propósito del siguiente trabajo fue el de implementar un control difuso a una plataforma robótica móvil o robot móvil basado en un vehículo híbrido de energía que se encargara de monitorear el consumo de corriente de los motores de CD del robot y del nivel de voltaje en la batería del mismo para poder así determinar si el motor de combustión interna entra en funcionamiento o permanece apagado, implementar este control es importante ya que así se ayudara a cuidar la vida útil de la batería al no permitir que esta se descargue en su totalidad evitando así ciclos de carga profunda, al implementar este control en el robot móvil se obtuvo un tiempo de carga menor para la batería logrando cuidar la vida útil de la misma.

*Palabras clave.* Robot móvil, lógica difusa, batería.

## 1. Introducción

La robótica es una rama de la ingeniería que se encarga del diseño, fabricación y operación de los robots y es que actualmente los robots se está integrando a muchos aspectos de la sociedad, podemos encontrar robots industriales, robots exploradores, robots militares, robots de servicio, robots médicos, robots espaciales, robots humanoides y la lista aumenta día con día, los robots no solo se pueden catalogar por su uso, también existe una clasificación que los divide por su entorno de trabajo, en esta clasificación podemos encontrar los robots fijos, los robots de suelo, los robots submarinos, los robots aéreos.

Es en los robots de suelo en donde la robótica tiene grandes problemas actualmente en cuanto a autonomía energética se refiere, los robots que se diseñan y fabrican son más complejos con el paso del tiempo, se integran diferentes sistemas por ejemplo sistemas de odometría, sistemas de localización satelital, diferentes sensores, microcontroladores o computadoras que permitan el correcto funcionamiento de los mismos, todo esto con la finalidad de que los robots sean capaces de realizar tareas más complejas y con niveles de dificultad mayor y son todos estos elementos los que generan una mayor demanda de energía eléctrica que en la mayoría de los casos proviene de un banco de baterías, es aquí en donde el problema de los robots de suelo radica, actualmente el desarrollo en la construcción de baterías es limitado por lo que el tiempo de operación de los robots de suelo también se ve afectado y las aplicaciones de los mismos se ven reducidas y condicionadas a las especificaciones de las baterías, para aumentar el tiempo de operación de los robots de suelo sería necesario integrar más baterías, lo que aumentaría el peso del robot, el costo del robot y finalmente el problema no se

solucionaría del todo, es por eso que en este artículo se plantea una solución para este tipo de robots y así aumentar su autonomía energética, en el Instituto Tecnológico de Orizaba se cuenta con una plataforma robótica móvil de ahora en adelante mencionada únicamente como robot móvil, su diseño y construcción está basado en un vehículo híbrido, lo cual quiere decir que en la parte superior de su chasis cuenta con un motor de combustión interna que a su vez esta acoplado a un alternador de energía, esto con la finalidad de proveer al robot móvil y a sus baterías la energía eléctrica necesaria para que su operación no se vea interrumpida, para controlar este mecanismos de carga de baterías se ocupó un sistema de control on-off y posteriormente se modificó y se realizó un control por medio de lógica difusa.

La lógica difusa trata de abordar los problemas de control tratando de imitar el pensamiento humano, sin embargo el ser humano utiliza expresiones ambiguas y subjetivas por ejemplo ese auto viaje a una medio rápido o esa persona es un poco bajita de estatura, para otro ser humano interpretar estas expresiones no sería un problema serio y basado en sus experiencias personales podría deducir el valor de la velocidad del vehículo o estimar la estatura de la persona, sin embargo interpretar clase de expresiones para una computadora que utilicé la lógica convencional o booleana de ceros y unos, sería un verdadero problema y resultaría en la realización de códigos muy complejos que terminarían por tardar demasiado tiempo en ejecutarse y ocuparían mucho espacio de almacenamiento en algún microcontrolador.

Otro ejemplo claro que explica el uso de la lógica difícil sería el siguiente, imaginemos que en un partido de futbol se marca una falta y se tiene que cobrar un tiro libre, el jugador tendría que analizar las siguientes posibilidades:

Si la portería está demasiado lejos, el futbolista tendría que pegarle demasiado fuerte al balón

Si la portería está demasiado lejos y el viento es fuerte hacia el lado derecho de la portería, el futbolista además de pegarle fuerte al balón tendría que modificar el ángulo del disparo para que se compensara con el viento que está corriendo en ese momento.

Estas son operaciones que la lógica convencional no podría hacer si bien se podría dividir la distancia del balón a la portería en intervalos y así tener aproximaciones cercanas a los valores de referencia de un humano esos intervalos acabarían por terminar haciendo lo mismo una distancia sería únicamente

lejana o cercana, pero no se tendría la capacidad de decidir que la distancia es media lejana, de esto es lo que trata la lógica difusa de partir de una base de conocimientos previos y poder tomar decisiones de control de un modo más parecido al razonamiento humano.

## 2. Parte técnica del artículo

El control difuso consiste en establecer una serie de reglas para controlar acciones: “Si el cuarto tiene temperatura alta entonces enciende el aire acondicionado”. Así los sistemas inteligentes de control basados en lógica difusa combinan variables de entrada, y por medio de una relación de reglas dan como resultado uno o varios valores de salida.

En la lógica clásica se define la pertenencia de los elementos en un conjunto como “Si pertenece” (1) o “No pertenece” (0), la lógica difusa acepta pertenencias parciales, define que la pertenencia de los elementos en un conjunto está entre los valores 0 y 1. Los conjuntos de lógica clásica tienen fronteras bien definidas, en el caso de la lógica difusa sus fronteras son imprecisas. Se puede decir que la lógica difusa es la generalización de la lógica clásica. [1]

Los sistemas difusos, son sistemas que toman decisiones basados en lógica difusa, es decir, toman decisiones de forma similar a la forma en que lo haría una persona. Mientras que la lógica Booleana se basa en la teoría clásica de conjuntos en donde sólo se tienen las posibilidades de pertenecer o no a un conjunto, en la lógica difusa se intentan modelar ambigüedades en la pertenencia a un conjunto, esto es, que tanto pertenece un elemento a un conjunto determinado, tales elementos son representados mediante variables lingüísticas.[2]

En la Fig. 1, podemos observar las cuatro partes que componen un sistema difuso, las cuales son: fuzificación, base de conocimiento, mecanismos de inferencia y defuzificación. [2]

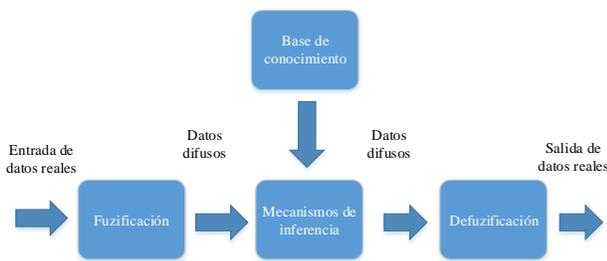


Fig. 1. Diagrama a bloques de un sistema difuso

### A. Base de conocimiento

La arquitectura que se observa en la figura veintiocho para un controlador difuso es la de una base de conocimiento. Para representar esta base de conocimiento existen muchos métodos, aunque para los sistemas de tipo reactivo (que responden a las entradas provenientes de sensores) como los controladores difusos el método preferido suele ser la representación en formas de reglas. Generalmente del tipo:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } X_2 \text{ es } A_2 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } Y \text{ es } B \quad (1)$$

Donde las  $X_i$  son salidas del sistema a controlar o funciones de dicha salida, provenientes de sensores o estimadores; las  $Y$  son directamente las variables manipuladas que tendrán que ser convertidas a valores únicos para manejar los actuadores; los  $A_i$  son conjuntos difusos. Así es como mediante reglas de este tipo se codifica en el sistema informático parte del conocimiento humano en el manejo del proceso, así como también los objetivos de control. [3]

### B. Mecanismo de inferencia

Es el encargado de concatenar las implicancias de la base de conocimiento, aplicando recursivamente una regla de inferencia composicional. Por ejemplo, el operador max/min.

Un proceso de inferencia difusa incluye dos conceptos; la implementación difusa y la regla composicional de inferencia. Si tenemos las observaciones  $A'$  y  $B'$ , entonces la conclusión difusa  $C'$  puede ser inferida como:

$$C' = (A', B') \circ R \quad (2)$$

Donde “o” representa el operador composicional. Dentro de las numerosas estrategias de inferencia, la técnica de Mandani es la más utilizada en los sistemas difusos de control existentes debido a su simplicidad. En este método, la operación del mínimo se adopta para calcular una relación de implicación difusa y el max-min como la regla composicional de inferencia.[3]

### C. Fuzificador

La función de este bloque es la de asociar a las diferentes entradas una función de pertenencia, acorde con la partición del universo de discurso que se haya efectuado. El fuzificador transforma la medición del valor determinístico de una variable en valores subjetivos mediante un proceso de verbalización. De esta manera, se pueden distinguir las siguientes funciones:

- Medir los valores de las variables de entrada.
- Hacer una adaptación de escalas desde estas variables de entrada y el universo de discurso, en una suerte de normalización.

- Asociar a la entrada un valor lingüístico que puede verse como la pertenencia a un dado conjunto difuso.[3]

#### D. Defuzidficador

A partir de los consecuentes de las reglas que se hayan disparado, es necesario obtener una única acción de control, combinando el resultado propuesto por cada una de ellas.

Para ello, este bloque es el encargado de servir de soporte para la aplicación de alguna de las técnicas elegidas (el máximo, la media de máximos, el centroide).

La defuzificación se realiza usualmente mediante cálculos promedio. Uno de los métodos más conocidos es el del centro de gravedad (COG), el cual es utilizado para calcular el baricentro de una masa.

#### E. Simulación en Matlab

Para elaborar el control por medio de lógica difusa del administrador de energía se realizó una simulación del funcionamiento del controlador.

Como primer paso se definieron las variables lingüísticas que fueron:

- Consumo de corriente en las ruedas
- Voltaje en la batería
- Motor de combustión interna

Estas variables se muestran en la Fig. 2.

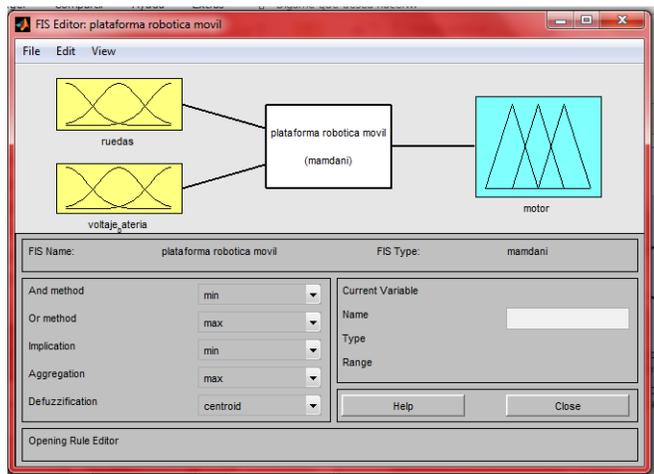


Fig. 2. Variables lingüísticas que contempla el controlador difuso

Como segundo paso se definen los valores lingüísticos asignados a nuestras variables lingüísticas, los cuales se enumeran a continuación y se muestran en la Fig. 3 para la variable lingüística de ruedas. Así mismo se establecen los rangos de trabajo para estos valores lingüísticos los cuales también se muestran en la Fig. 3.

- Muy bajo
- Bajo
- Intermedio
- Alto
- Muy alto

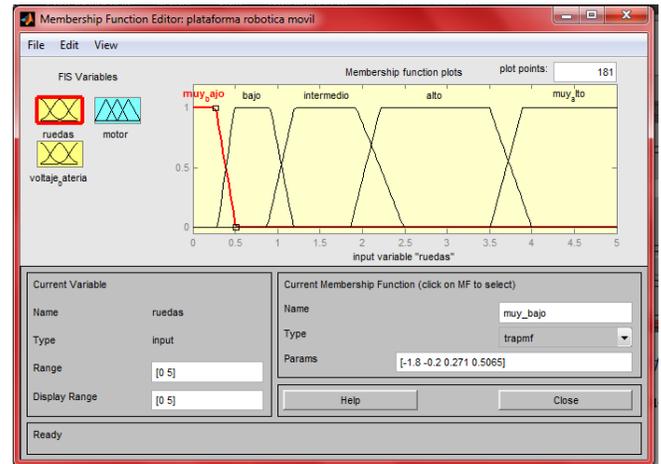


Fig. 3. Valores lingüísticos y rangos de trabajo para la variable lingüística de ruedas del controlador difuso

En la Fig. 4 se muestran los rangos de trabajo para la variable lingüística de voltaje en la batería. Para esta variable lingüística se utilizaron nuevamente los valores lingüísticos antes mencionados, es decir; muy bajo, bajo, intermedio, alto y muy alto.

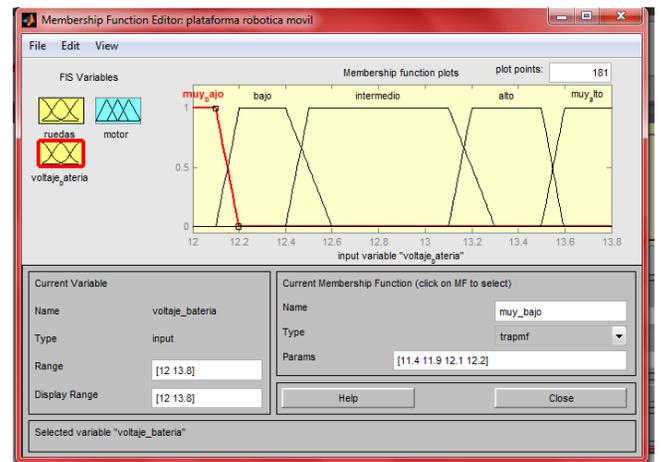


Fig. 4. Valores lingüísticos y rangos de trabajo para la variable lingüística de voltaje en la batería del controlador difuso.

En la Fig. 5 se muestran los valores lingüísticos y rangos de trabajo para la variable lingüística de motor del controlador difuso. En este caso únicamente se utilizaron dos diferentes tipos de valores lingüísticos que son encendido y apagado.

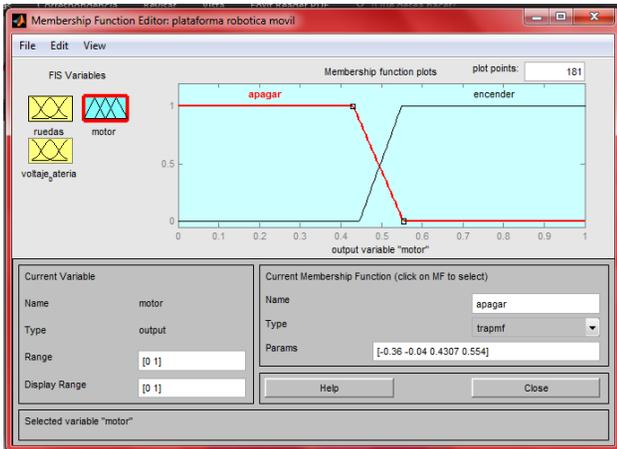


Fig. 5. Valores lingüísticos y rangos de trabajo para la variable lingüística de motor del controlador difuso.

El tercer paso es crear las reglas necesarias en base a los conocimientos de un experto para generar la base de conocimiento del controlador difuso. Estas reglas son del tipo IF A and/or B THEN C. en la Fig. 6 se muestran este conjunto de reglas difusas.

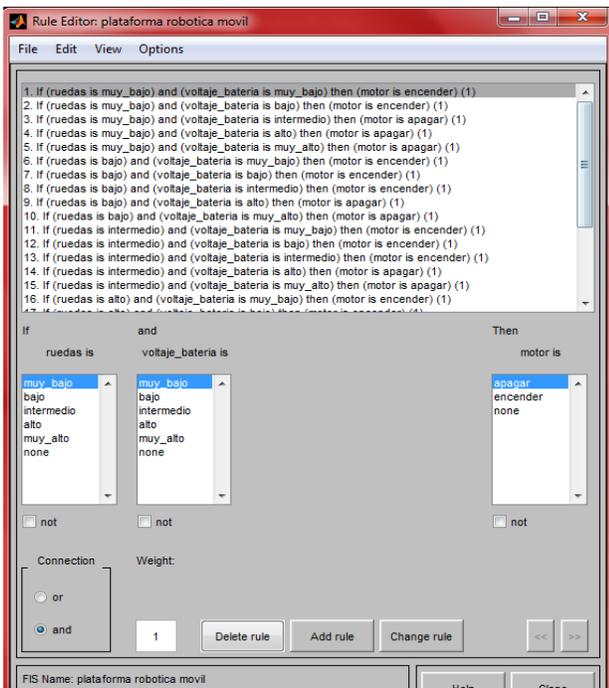


Fig. 6. Conjunto de reglas difusas que integran la base de conocimientos del controlador difuso.

El cuarto paso es observar el comportamiento o variación en el tiempo de nuestras reglas difusas con sus respectivas salidas, en la simulación se pueden modificar los valores de las entradas para conocer cómo afectan estos cambios a la salida del sistema lo cual se muestra en la Fig. 7.

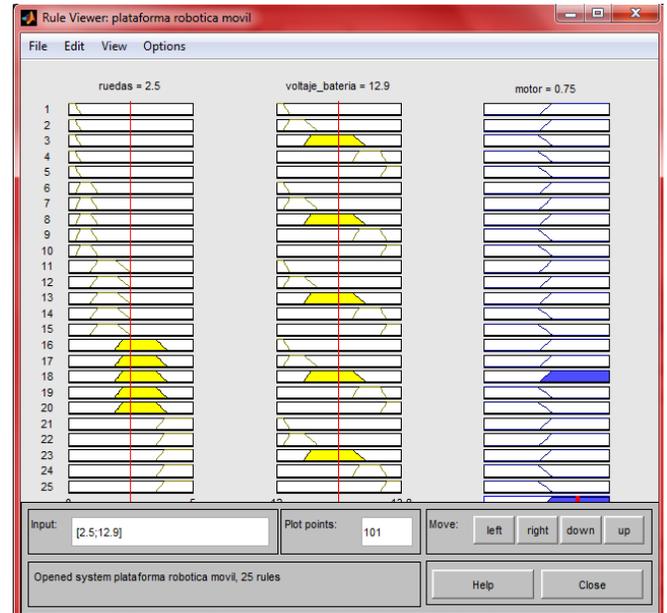


Fig. 7. Resultado de la interacción de las variables difusas y la salida.

La superficie de control del controlador difuso se muestra en la Fig. 8.

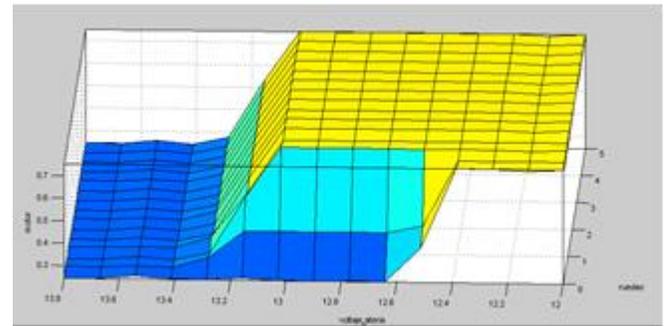


Fig. 8. Grafica en 3D de la respuesta del controlador difuso.

La plataforma robótica móvil en la que se implementara el control difuso se muestra en la Fig. 9, en la cual se puede observar que el robot móvil cuenta con cuatro ruedas y cada una de ellas cuenta con su propio motor de DC, además tiene un sistema de dirección electrónica, en la imagen también es posible observar que en la parte superior del chasis de la plataforma se encuentra instalado un motor de combustión interna el cual esta acoplado a un alternador por medio del cual se cargan las baterías de la plataforma robótica móvil.



Fig. 9. Plataforma robótica móvil a la cual se le acoplo el motor de combustión interna.

#### F. Resultados de pruebas realizadas

Como resultado de la carga de baterías utilizando únicamente la red eléctrica. Se muestra la siguiente grafica en la Fig. 10 en donde se observa que al principio de la carga de la batería el consumo de corriente es alto, pero conforme avanza el tiempo este consumo de corriente va disminuyendo hasta llegar a un punto constante.

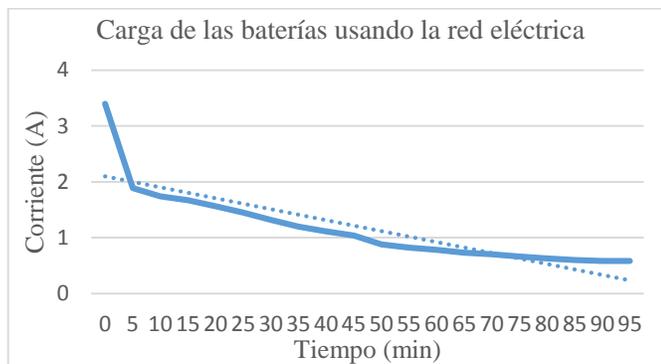


Fig. 10.

La siguiente prueba que se realizo fue cargando las baterías utilizando el alternador acoplado al motor de combustión interna, el resultado de esta prueba se muestra en la Fig. 11, en la cual se puede observar un comportamiento similar al de la gráfica anterior en donde al principio el consumo de corriente por parte de la batería es elevado y conforme el tiempo transcurre este de consumo de corriente se vuelve constante.

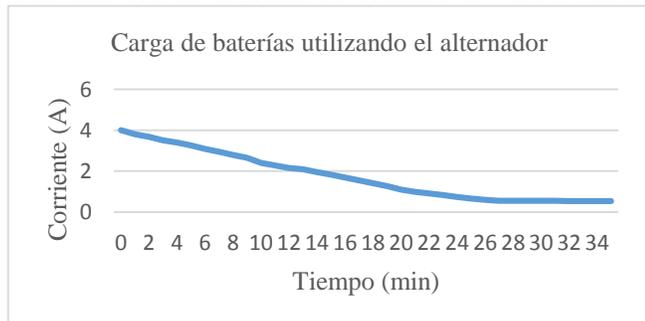


Fig. 11.

la diferencia está en el tiempo en que esto se lleva a cabo ya que cuando la batería se carga usando la red eléctrica el tiempo que transcurre para que la batería se cargue es de 95 minutos mientras que con el uso del alternador únicamente transcurren minutos.

Posteriormente se realizó una prueba en la cual se cargó la batería del robot móvil utilizando nuevamente el alternador, pero en esta ocasión fue implementado el control difuso, los resultados se muestran en la Fig. 12, en la cual se observa nuevamente que en un principio el consumo de corriente por parte de la batería es elevado, pero con forma pasa el tiempo este disminuye.

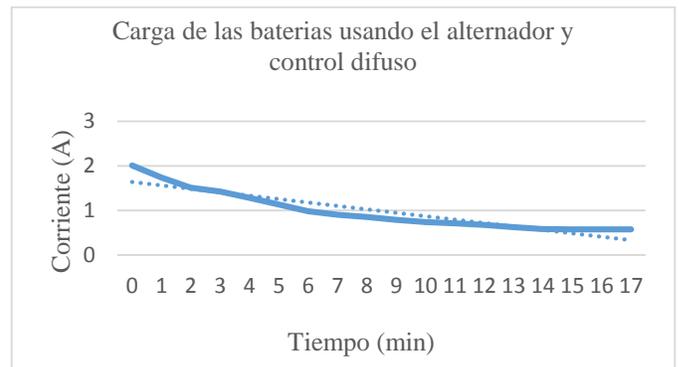


Fig. 12.

Nuevamente a diferencia entre las tres graficas es el tiempo en el que la batería se carga, teniendo un menor tiempo de carga cuando se implementa el control difuso,

### 3. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos que se mostraron en las gráficas de la Fig. 10, 11 y 12 se puede decir que se redujo significativamente el tiempo de carga de la batería del robot móvil, también se observa en la gráfica que al implementar el control difuso la energía demandada por la batería al alternador es menor lo cual ayuda a mejorar la vida útil de la misma al no permitir regímenes de carga profunda, además al implementar el sistema híbrido de energía en el robot el tiempo de operación del mismo ya no depende exclusivamente de su batería.

### 4. Referencias

- [1] Espino Núñez Arturo., "Control de temperatura con lógica difusa para un sistema de espectroscopia láser," pp. 1-129, 2017.
- [2] Valdivia Saldaña M., "Control De Temperatura De Una Habitación Mediante Logica Difusa," 2014.
- [3] Meneses Benavides Gustavo Adolfo, "Control difuso de temperatura para carga resistiva con microcontrolador de 8 bits.," 2005.

### 5. Biografías

Ing. Roberto Maciel Vazquez Trujillo  
Estudiante Maestría en Ingeniería Electrónica (TecNM/ITO)

Ingeniero en electrónica (TecNM/ITO)  
Dr. Ignacio Herrera Aguilar  
Profesor Investigador / Jefe del Laboratorio de Procesamiento de Señales  
Doctor en Sistemas Automáticos (Universidad Paul SABatier, en el  
Laboratorio LAAS-CNRS, Francia)  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica (CENIDET)  
Ingeniero en Electrónica (I.T. Orizaba)  
Áreas de Investigación: Robótica, Mecatrónica, Visión por Computadora,  
procesos Estocásticos, Control, Automatización.

Dr. Gerardo Águila Rodríguez  
Profesor Investigador / Jefe del Laboratorio de Sensores e Interfaces  
Multimodales  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (CINVESTAV)  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica (CINVESTAV)  
Ingeniero en Electrónica  
Áreas de Investigación: Física de semiconductores, optoelectrónica,  
electrónica analógica y sensores.

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval González  
Profesor Investigador / Jefe del Laboratorio de Robótica y Automatización  
/ Secretario de Academia  
Miembro del Sistema Nacional de Investigadores  
Doctor en Robótica (Scuola Superiore Sant'Anna, en el Laboratorio  
PERCRO, Pisa, Italia)  
Maestro en Ciencias en Mecatrónica (FH Aachen University of Applied  
Sciences, Alemania)  
Tecnólogo en Mecatrónica (CIDESI)  
Ingeniero en Electrónica (I.T. Orizaba)  
Áreas de Investigación: Robótica, Mecatrónica aplicada al sector industrial  
y de salud, Háptica, Rehabilitación, Reliada Virtual, Computer Visión,  
Machine Learning.

Dr. Albino Martínez Sibaja  
Profesor Investigador / Presidente de Academia  
Miembro del Sistema Nacional de Investigadores SNI  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica (CENIDET)  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica (CENIDET)  
Ingeniero en Electrónica (I.T. Veracruz)  
Áreas de Investigación: Electrónica de Potencia, Control Tolerante a  
Fallas.

# Construcción de software, utilizando metodologías ágiles, para el registro y control virtual del acceso de motocicletas al parqueadero de la Universidad de Cundinamarca, Colombia.

R. Rodríguez<sup>1,a</sup>, D. Bustos<sup>1,b</sup>, F. Lanza<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> universidad de Cundinamarca

<sup>a</sup> rogerarodriguez@ucundinamarca.edu.co, <sup>b</sup> dfbustos@ucundinamarca.edu.co

, <sup>c</sup> flanza@ucundinamarca.edu.co

## Resumen—

El presente artículo describe la construcción de una solución de software, utilizando metodologías ágiles de desarrollo, para el registro y control de acceso de motocicletas al parqueadero de la Universidad de Cundinamarca, Colombia. El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de información para el apoyo administrativo de dicha Universidad, que permitirá el registro y control virtual del personal que hace uso del parqueadero, soportado por un módulo web, apoyándose en un sistema de almacenamiento de imágenes destinado al registro de los usuarios y su correspondiente vehículo, el cual brindará seguridad al hacer uso del parqueadero, debido a la confirmación visual del usuario con la imagen registrada en las bases de datos, permitiendo además optimizar el uso de los espacios físicos del parqueadero de la universidad.

*Palabras clave. Agilidad, Sistema de información, Software, Control de acceso, Gestión de imágenes.*

## 1. Introducción

El presente artículo, describe la propuesta de construcción, utilizando metodologías ágiles, de una solución de software para el registro y control virtual de acceso de motocicletas al parqueadero de la Universidad de Cundinamarca, Colombia.

El software contara con dos componentes clave, que permitirán llevar control rápido y confiable sobre el acceso al parqueadero de la Universidad de Cundinamarca. Primero, como sistema de información contará con una estructura relacional capaz de mantener un registro estable, que permita llevar registros históricos verídicos, además de ser capaz de facilitar la realización de consultas en tiempo real. Su desarrollo como plataforma web permitirá que sea accesible desde cualquier equipo o lugar. Segundo, se plantea un registro grafico de vehículos y sus respectivos propietarios, lo cual permitirá llevar un control seguro y confiable, al corroborar la identidad de la persona que ingresa o egresa un vehículo al parqueadero y que corresponda con la del legítimo dueño delvehículo.

La finalidad del proyecto es garantizar, apoyado en tecnología informática, el adecuado acceso y control al

parqueadero de motocicletas de una de las sedes de la Universidad de Cundinamarca, mejorando de manera significativa el procedimiento manual que se le da actualmente al acceso de vehículos, permitiendo además, optimizar espacios físicos del parqueadero.

## 2. DESARROLLO DE PROPUESTA

### A. Planteamiento del problema

La Universidad de Cundinamarca, extensión Facatativá, hace parte de las cinco (5) extensiones y tres (3) sedes que conforman esta entidad educativa pública y departamental. Dicha extensión de la UCundinamarca, cuenta con un amplio parqueadero destinado para las motocicletas.

Debido al crecimiento masivo del uso de este tipo de vehículo entre los integrantes de la comunidad Universitaria, junto a la ausencia de una adecuada gestión y control de acceso al parqueadero, lo cual se realiza actualmente de manera manual, generando molestias y congestión al hacer uso del parqueadero, creando la necesidad a las directivas de la Universidad de solicitar al Centro de Innovación y Tecnología –CIT, del programa de Ingeniería de Sistemas de la UCundinamarca, la construcción de una solución informática como apoyo tecnológico para mejorar el proceso de control y acceso al parqueadero de las motocicletas.

### B. Metodología de investigación

Luego de identificar la problemática es posible plantear soluciones factibles, como la construcción de un sistema de información que permita registrar los usuarios con su respectivo vehículo automotor, y a partir de estos datos mantener un control de los ingresos y salidas del parqueadero.

Para la construcción de esta plataforma se seguirán los estándares de desarrollo de software planteados por el CIT, el

cual está constituido por docentes investigadores y estudiantes desarrolladores de software que están cursando los últimos semestres del programa de ingeniería de Sistemas. El CIT proporciona a los estudiantes de ingeniería de sistemas la iniciativa para la realización de proyectos enfocados a la automatización mediante software, propiciando un ambiente de trabajo bajo estándares de programación de alto nivel, además de la guía y asesoría de los docentes investigadores pertenecientes al mismo.

Los estándares dados por el Centro de innovación y tecnología –CIT, comprenden todo el ciclo de desarrollo de plataformas, desde la investigación previa para abordar con claridad el problema a resolver hasta los estándares de evaluación de calidad del software final.

El CIT cuenta con herramientas y lineamientos útiles en cada fase de la elaboración de software, a la cabeza de un equipo de desarrollo compuesto por estudiantes. Las plataformas realizadas bajo la dirección del Centro de Innovación y Tecnología son llevados a un entorno de producción de software, ya que estos proyectos van más allá de la planeación teórica, se lleva a la práctica donde los proyectos se encuentran desplegados en un servidor web y son usados en la administración de diferentes áreas de la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá.

Una de las metodologías de desarrollo empleadas por el Centro de Innovación y Tecnología para el desarrollo de proyectos es la metodología ágil SCRUM, reconociendo que esta metodología es utilizado en proyectos de desarrollo de Software, proyectos donde tengan características tales como: los requerimientos son cambiantes, el equipo de trabajo es pequeño, tiempos de implementación cortos, y se quiera evitar documentaciones innecesarias. [1]

En el presente proyecto se implementarán sus características más destacadas como son:

- Uso de roles, lo cual permitirá una mayor eficiencia en la cadena de trabajo, delegando responsabilidades a cada integrante del proyecto, agilizando la elaboración en paralelo de distintos componentes.
- Sprint de desarrollo, una de las características más importantes de SCRUM, que permitirá la realización de ciclos de trabajo, permitiendo una retroalimentación permanente del estado y avance del proyecto y así realizar correcciones oportunas de errores técnicos y funcionales.
- Monitoreo de Sprint para generar resultados, permitirá la fijación de las tareas específicas a realizar en cada ciclo de trabajo, dando un orden

lógico al avance del proyecto, evitando fallos en la planeación y ejecución del mismo.

### C. Metodología de desarrollo

El desarrollo de la plataforma está proyectado para su integración como un módulo perteneciente a una plataforma superadministrador ya en producción en el CIT, desarrollada y en funcionamiento, llamada SIAAF (Sistema de información para el apoyo académico Facatativá), uno de los proyectos desarrollados por el Centro de innovación.

El desarrollo de este tipo de sistemas de control como módulos de una plataforma administrativa proporciona una serie de ventajas, en su desarrollo ya que proporciona una serie de plantillas básicas y lógicas que pueden adaptarse a los requerimientos de cada módulo informático. Asimismo, no solo agiliza el proceso de desarrollo gracias a la reutilización de plantillas, marcos de trabajo y librerías, sino que también proporciona orden y eficiencia al trabajo.

La generación de un estándar de desarrollo, desde su documentación hasta la escalabilidad del módulo al momento de ser desplegado como plataforma web, permite la integración, facilitando la centralización, y normalización de los datos, guardados en base de datos, ya que los módulos proyectados en la optimización de procesos administrativos en la Universidad de Cundinamarca, contienen datos sensibles relacionados a los estudiantes de la institución y algunos directivos.

El desarrollo de la presente solución de software , implica la creación de clases dinámicas que permitan la creación, modificación, eliminación y listado de los estudiantes que harán uso del parqueadero, luego de tener un registro fotográfico de los estudiantes se procederá a crear el submódulo para administrar los vehículos automotores, asociando cada vehículo con su respectivo propietario, luego de tener la información que da soporte al sistema, se debe crear un apartado que permita gestionar el control de ingresos y salidas de vehículos, utilizando confirmación visual del propietario de cada vehículo, garantizando la seguridad de los vehículos que se encuentren, como ingreso activo, dentro del parqueadero.



Fig. 1. Diagrama base representando el ciclo que cumplirá la información a través del sistema

La gestión de ingresos y salidas, generara un registro histórico de uso del parqueadero, el cual contara con la generación de reportes descargables, para hacer una revisión histórica del uso del parqueadero tanto de forma general sobre todos los vehículos como de casos específicos, con informes generados ya sea de vehículos, usuarios u horarios específicos.

#### D. Antecedentes

En un caso similar a la problemática de la universidad de Cundinamarca extensión Facatativá, se encontró sistemas de información implementados en la Universidad Distrital “Francisco José de Caldas”, Bogotá, Colombia, para el control del acceso de vehículos al parqueadero de las instalaciones, el cual debía ser optimizado para mejorar la gestión del espacio, el registro de vehículos y usuarios y sobre todo brindar seguridad a los usuarios respecto a la entrada y salida de vehículos.[2]

La administración manual de la información genera uno de los problemas más significativos que se pueden encontrar en los parqueaderos, como es la gran cantidad de tiempo que consume verificar la disponibilidad de los servicios, cada vez que algún usuario los solicite, pues la verificación de los espacios logísticos a menudo tarda demasiado tiempo al ser buscados de forma personal. También en la elaboración de diversos recibos se suelen presentar demoras injustificadas y desgastes innecesarios de estos recursos, lo que le genera a la organización pérdidas económicas y desprestigio en su imagen comercial.[3]

Existen empresas que ofrece soluciones de control de parqueo mediante software a la medida es Tecnología CIWS con su sistema de nombre CIWS Parking el cual es un software diseñado para la administración básica y avanzada de

parqueaderos bajo una tecnología web ya que su sistema como lo informa en su sitio web está desarrollado en PHP, HTML y MySQL, y cuenta con características relevantes como el uso de sistemas de creación de tarifas, ingreso y salida de vehículos por medio de carnets o tirillas de códigos de barras, mensualidades por medio de tarjetas de proximidad o códigos de barras o por placas, control de cupo, administración de espacios en el parqueadero, reporte de movimiento vehicular, reporte de recaudo, reporte de históricos de vehículos entre otras.

#### E. Resultados esperados

La Universidad de Cundinamarca es una universidad pública y departamental colombiana, adscrita al sistema universitario estatal y con sede principal en el municipio de Fusagasugá Cundinamarca; La extensión Facatativá hace parte de las cinco (5) extensiones y tres (3) sedes que conforman la UCundinamarca (Universidad De Cundinamarca) ubicada en el municipio de Facatativá; Para el segundo semestre del año 2017 en la universidad se encontraban 13.460 estudiantes matriculados en pregrado y 472 en postgrado de los cuales 3.507 estudiaban en la extensión Facatativá .[4] Por lo anterior y debido a la gran demanda del servicio de parqueadero de motocicletas, se requiere contar, lo más pronto posible, con una solución de software que optimice el acceso y control al parqueadero.

El Centro de Innovación y Tecnología del programa de Ingeniería de Sistemas de la UCundinamarca, se propone construir una solución de software, utilizando la metodología de desarrollo ágil SCRUM, sistema informático permitirá el control eficiente del acceso al parqueadero de motocicletas que arroje, además, estadísticas o información referente a dicha área, lo cual le permitiría a la universidad optimizar los recursos físicos disponibles para el parqueo de este medio de transporte, que es el más usado por los estudiantes y demás personal que ingresa a la universidad; este sistema aportará en temas como la seguridad en la entrada y salida de los vehículos (motocicletas) y personal, asimismo proporcionara a los directivos una base de datos para la elaboración de reportes, estadísticas y otros resultados, que les sea de ayuda para estudios posteriores.

### 3. Conclusiones

La construcción de este tipo de soluciones de software permitirá evidenciar como a través del uso de la tecnología informática y utilizando metodología agiles de desarrollo, es posible la estandarización de procesos que facilitan una mayor eficiencia en la administración de recursos físicos, como lo es el parqueadero de la Universidad de Cundinamarca, además de proporcionar un marco investigativo para el desarrollo de

soluciones de software que incentive a los estudiantes a la innovación y optimización en procesos administrativos.

La utilización de herramientas y estándares proporcionados por el Centro de Innovación y Tecnología –CIT, han propiciado un ambiente de trabajo donde los estudiantes del programa de Ingeniería de Sistemas, generan propuestas para resolver las problemáticas locales y globales, dándole la oportunidad de contar con la guía de docentes expertos investigadores, además de generar una hoja de ruta para que estos proyectos puedan ser realizados y puestos en producción.

Además se puede evidenciar, como la realización de pruebas automatizadas para medir la calidad y nivel de usabilidad de plataformas web, permite mejorar la calidad, no solo del software como producto final sino de mejorar todo el proceso productivo desde la planificación hasta la puesta en marcha de productos de software.

#### 4. Referencias

- [1] K. Schwaber and J. Sutherland, “La Guía de Scrum,” *Scrumguides.Org*, vol. 1, p. 21, 2013.
- [2] J. Ulises and U. Cuellar, “Sistema de Información de Gestión de Parquaderos,” 2016.
- [3] H. Herrera, M. Enrique, D. : Hernandez Alvarez, and M. Beatriz, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS,” 2016.
- [4] universidad de Cundinamarca, “Rendicion de Cuentas,” *udec*, vol. 1, p. 140, 2017.

#### 5. Biografías

Francisco Alfonso Lanza Rodríguez:

Docente investigador vinculado a la Universidad de Cundinamarca (Colombia), titulado como Ingeniero de sistemas, con licenciatura en Matemáticas y física, especializado en pedagogía y docencia académica. Magister en Direccionamiento Estratégico de Tecnologías de la información, Especialidad empresas de software.

Roger Alejandro Rodríguez Velandia

Estudiante del programa ingeniería de sistemas, de la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá, Colombia.

Diego Fernando Bustos Mahecha

Estudiante del programa ingeniería de sistemas, de la Universidad de Cundinamarca extensión Facatativá, Colombia

# Implementación de red neuronal en microcontrolador para la detección de números

C. A. Navarro<sup>1,a</sup>, A. Izaguirre<sup>1,b</sup>, N. A. Rodríguez<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Asistencia Técnica del Estado de Querétaro, Maestría en Sistemas Inteligentes Multimedia

<sup>2</sup> Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Área Energía

<sup>a</sup> cang24@yahoo.com.mx, <sup>b</sup> izaguirrearon@gmail.com, <sup>c</sup> noeamir@gmail.com

**Resumen**—En la actualidad el uso de algoritmos de inteligencia artificial se ha extendido a diversos campos logrando de esta manera incrementar notablemente el acervo científico sobre este tópico. Sin embargo, por la naturaleza de los microcontroladores orientados mayormente a la implementación de lógica y no al cálculo exhaustivo, estos se han visto relegados en lo que se refiere a IA. En el presente trabajo se busca explorar esta rama de implementación y se presenta un sistema de reconocimiento de caracteres numéricos basado en un microcontrolador de la familia MSP430 y en un perceptrón multicapa (MLP). A partir de una imagen binarizada que se recibe por comunicación serial el sistema identifica el número representado en ella.

MLP, MSP430, OCR.

## 1. Introducción

Las redes neuronales son una herramienta de la inteligencia artificial con ya un amplio camino recorrido desde su presentación de los trabajos de Warren McCulloch y Walter Pitts. Hoy en día con el surgimiento de áreas como el Deep Learning la investigación y aplicación de las redes neuronales se ha extendido con mayor fuerza que antes. Una de las redes neuronales más elementales es el perceptrón multicapa que en su implementación utiliza comúnmente los algoritmos de feed forward y backpropagation, ambos se implementan comúnmente con tipos de datos de punto flotante y, por la cantidad de entradas, neuronas y capas, que impliquen el uso de arreglos terminando en algoritmos que implican operaciones matemáticas sobre arreglos de puntos flotantes. Por otro lado los microcontroladores son componentes que comúnmente se utilizan para el manejo de secuencias de lógica para el control de flujos de datos por lo que en su arquitectura (al menos la familia MSP430 de Texas Instruments) no implementan la operación de multiplicación, elemental en la aritmética. Sin embargo los microcontroladores son elementos con excelentes capacidades de comunicación con otros dispositivos, de costos accesibles para una amplia gama de aplicaciones y cuentan con prestaciones como el bajo consumo de energía lo cual los hace destacar en diferentes aplicaciones

La mezcla de las dos situaciones anteriores ocasiona que la investigación sobre estos dos tópicos sea limitada. Este trabajo busca explorar las capacidades de estos microcontroladores en este campo. Como entrada se recibe una imagen binarizada como una matriz de ceros y unos que será la entrada del perceptrón, el conjunto de caracteres que se busca reconocer es el conjunto de números arábigos por lo que se tendrán 10

escenarios a reconocer, y como salida se tendrá un dígito el cual será representado en formato BCD.

## 2. Parte técnica del artículo

El proyecto está enfocado en el microcontrolador MSP430F5529 específicamente. Por lo que es importante indicar las particularidades relevantes que han sido tomadas en cuenta en este proyecto:

TABLA I. ASPECTOS RELEVANTES DEL MSP430F5529

Característica	Valor
Memoria	128 Kb
Procesador	25 Mhz
GPIO	Si
USCI	USCI_Ax(UART)

El proyecto se compone de tres módulos principales que definen las tareas principales que se realizan: adquisición de datos de entrada, procesamiento con la red neuronal y comunicación del resultado.

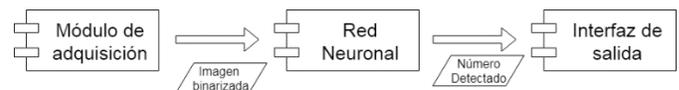


Figura 1. Módulos del sistema

El módulo de adquisición se encarga de recibir por comunicación serial la información de entrada. Para conseguirlo habilita la comunicación UART mediante la configuración de la velocidad y fuente de reloj, así como de definir la rutina de manejo de la interrupción para la recepción de información y la rutina para el envío de información.

El módulo de la red neuronal es el que contiene la parte sustancial del proyecto. Está conformado por la sección de definición de variables que permiten el trabajo con la red neuronal, como son los arreglos para los pesos y umbrales, la tasa de aprendizaje y el error mínimo que se busca en la ejecución de la red. La información de entrada será una matriz

con datos binarios los cuales representan un dígito como se muestra a continuación:

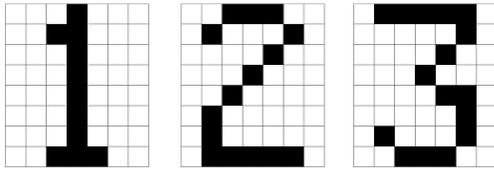


Figura 2. Representación de números como imagen binarizada

Esta información se supone proveniente de otro dispositivo como puede ser otro microcontrolador, un DSP, etc. y básicamente sería una imagen que limita la región en la cual se encuentra y posteriormente lo binariza. Una vez adquirida sería almacenada como un arreglo de bytes en el MSP430 y cada uno de los píxeles sería una entrada para la red neuronal. La red neuronal posteriormente aplicaría los algoritmos de feedforward y backpropagation para su entrenamiento donde se evaluaría el desempeño del microcontrolador para definir un umbral de error y tasa de aprendizaje apropiados.

Se identifican dos escenarios principalmente para experimentar: entrenar la red neuronal en el microcontrolador y ejecutar una red previamente entrenada. El primero de ellos implica un tiempo mayor de inicialización para estar disponible para procesar entradas pues la capacidad de procesamiento disponible será limitada, el propósito de realizarlo sería mantener la posibilidad de actualizar la red neuronal para adaptarse a nuevos escenarios, por ejemplo, un producto que se adapte a la caligrafía de un tipo específico y que por lo tanto tenga mayor flexibilidad. El segundo caso sería adquirir datos de un entrenamiento previo de la red neuronal, la gran ventaja sería el tiempo en que el dispositivo se encontraría disponible para evaluar escenarios de entrada, algo que puede ser crucial para algunas aplicaciones.

En cuanto al diseño de la red neuronal se tiene contemplado inicialmente una red con una capa oculta y se aplicarían diferentes técnicas para la definición del número de neuronas que se implementarían, considerando también el tamaño de la memoria requerido para almacenar la información correspondiente, sin embargo dependiendo de los resultados obtenidos en las ejecuciones se puede ampliar el número de capas ocultas con la finalidad de obtener un mejor rendimiento al aplicar un crecimiento horizontal en lugar de vertical en las capas internas.

Por último el módulo de la interfaz de salida está conceptualizado simplemente como el conjunto de funciones que se encargaran de la tarea de enviar por un puerto general el

resultado representándolo en formato de BCD, para lo cual básicamente se haría la configuración inicial y el envío de las señales del número codificado a los pines del puerto configurado.

Los resultados esperados al final de este trabajo están orientados a evaluar la capacidad de procesamiento de estos microcontroladores para este tipo de proyectos, en esta investigación se analiza una red que solo trabaja en la detección de números pero al ampliar la cantidad de caracteres permite ampliar el número de aplicaciones donde se puede ubicar este desarrollo. Para esto, los dos puntos más importantes a evaluar son el desempeño y la memoria disponible pues son los recursos más limitados en ellos. Para lidiar con ellos se han definido una serie de posibles estrategias a implementar para solventar estos problemas.

#### A. Definición acertada del número de neuronas en la red.

Cada neurona en la red implica una carga tanto en memoria como en procesamiento para el microcontrolador por lo que realizar el cálculo del mínimo de neuronas es crucial. Para llevar esto a cabo se ejecutarán diferentes ejecuciones con el número de neuronas indicadas por medio del cálculo arrojado por varios métodos.

#### B. Evaluar la diferencia en el desempeño al cambiar la configuración de las capas internas.

Al establecer conexiones entre todas las neuronas de una capa interna con todas las neuronas de la capa anterior se estima que se requiere un menor número de iteraciones de entrenamiento si se incrementa el número de capas internas en lugar de incrementar el número de neuronas en una capa. Sin embargo a medida que se incrementa el número de capas la complejidad del algoritmo de backpropagation se incrementa también. Es por esto que se debe de buscar un balance apropiado al manejar estos elementos en el diseño de la red neuronal.

La evaluación de la efectividad de la red se realizará bajo los siguientes criterios:

- Ejecución de múltiples series de ejecuciones de pruebas cambiando el número de iteraciones para obtener un parámetro que defina la relación de casos de detección exitosos contra el número de iteraciones de entrenamiento.
- Identificar la distribución de los fallos en los caracteres que se busca reconocer, con el objetivo de posteriormente evaluar si el entrenamiento enfocado a un subconjunto de caracteres permite mejorar la efectividad de la red.

Se realizaron 4 conjuntos de ejecuciones, distinguidas cada una por el número de iteraciones en el entrenamiento de la red neuronal. Inicialmente se realizaron ejecuciones de prueba buscando identificar un número de iteraciones apropiado para garantizar que la mayoría de los números son reconocidos, se tomó el 12 como el número mínimo de iteraciones. Los números de iteraciones tomados para la revisión fueron 12, 15, 18 y 24. Cada conjunto de ejecuciones estaba formado por 5 ejecuciones en donde cada una buscaría reconocer los 10 dígitos. El conjunto de resultados se analizó para identificar como se definió: que bits no fueron apropiadamente reconocidos y que números son los que más fallan en el reconocimiento. A continuación se muestran los resultados obtenidos de manera gráfica y tabular acompañados de su correspondiente análisis:

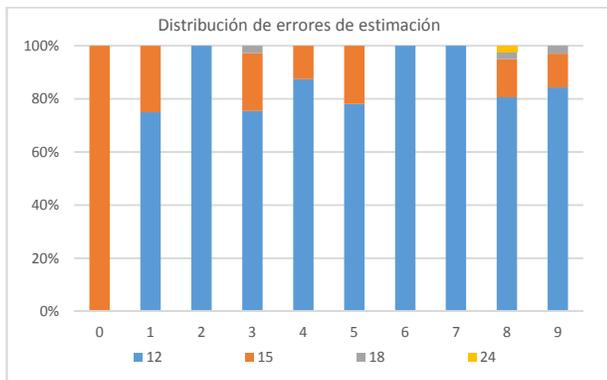


Fig 1. Comparacion visual de los fallos

TABLA I. DISTRIBUCION DE ERRORES DE RECONOCIMIENTO POR DIGITO

		Digitos									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Iteraciones	12	0	3	11	114	7	25	13	1	129	86
	15	1	1	0	33	1	7	0	0	23	13
	18	0	0	0	4	0	0	0	0	4	3
	24	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0

TABLA II. RELACION DE ERRORES POR CONJUNTO

Iteraciones	Errores	%
12	389	7.78
15	79	1.58
18	11	0.22
24	4	0.08

Como se puede observar el número de fallos en el reconocimiento se reduce de manera drástica a medida que se incrementa el número de iteraciones, obteniendo las cifras de

porcentajes se ve que se reduce del 7.78% a 0.08% entre las corridas con 12 y 24 iteraciones. Otra observación que se puede obtener de estos datos es que al pasar de 12 a 15 iteraciones, el promedio de fallos (38.9) en el conjunto de 12 iteraciones resulta ser la mitad del total de fallos en el conjunto de 15 iteraciones (79). Por último, se observan dos comportamientos que resaltan, el reconocimiento del digito 0 solo falla en una ocasión (en el conjunto de 15 iteraciones) y el numero 8 es el más complejo en reconocerse, siempre se mantiene a la cabeza en los fallos excepto en el conjunto de 15 iteraciones.

### 3. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido validar la aplicación de este tipo de micro controladores en el campo de las redes neuronales. A pesar de sus limitadas capacidades para la ejecución de cálculo son capaces de ejecutar una red neuronal y aunque el proceso de entrenamiento resulta largo (alrededor de 15 segundos por iteración) una vez que se tiene el entrenamiento necesario se puede evaluar las entradas de una manera rápida y efectiva.

El procedimiento de análisis de los resultados ha arrojado una serie de ideas sobre cómo implementar cambios al sistema para mejorar el reconocimiento y también de posibles puntos negativos como el hecho de que las entradas siempre se enviaron al proceso de entrenamiento en la misma secuencia y que los datos de validación de los resultados son los mismos usados en el entrenamiento.

Los resultados obtenidos motivan al equipo para continuar con la investigación en este campo con el objetivo de resolver las nuevas inquietudes encontradas durante el desarrollo de la investigación así como las ideas para robustecerla.

### 4. Referencias

- [1] J. Monroy, A. Ramirez, E. Lopez, R. Alejo, "Aspectos relevantes para mejorar el desempeño del algoritmo backpropagation", Revista de Sistemas Computacionales y TIC's, Vol. 1, 2016.
- [2] Texas Instruments, "MSP430x5xx and MSP430x6xx Family User's Guide", June 2008
- [3] Rafael Alberto Moreno Parra, "Redes Neuronales Parte I", <https://openlibra.com/es/book/download/redes-neuronales-parte-1>, 2016.

### 5. Biografías

**Noé Amir Rodríguez Olivares** Ingeniero Mecatrónico egresado del Instituto Tecnológico de Poza Rica en el 2012. Obtuvo el grado de Maestría en Mecatrónica en el 2014 y actualmente estudia el Doctorado en Mecatrónica en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial de la ciudad de Querétaro, Querétaro, México. Su área de interés es en sistemas de almacenamiento de información

**César Augusto Navarro Gómez** Ingeniero en Sistemas

Computacionales egresado del Instituto Tecnológico de Pachuca en 2003. Ha ejercido principalmente en el área de sistemas de misión crítica del sector bancario y telecomunicaciones. Su área de interés es visión por computadora e inteligencia artificial.

**Aarón Izaguirre Solís** Ingeniero en Electrónica con especialidad en Automatización y Control, egresado del Tecnológico Nacional de México campus San Luis Potosí en 2015. Ha trabajado principalmente en al área de innovación y desarrollo para la industria alimentaria. Su área de interés es el desarrollo de sistemas embebidos y automatización de procesos.

# Transcripción Automática de Batería con Redes Neuronales Convolucionales Cerradas y Función de Costo Focal.

M. Pessat<sup>1,a</sup>, T. Nakashika<sup>2,b</sup>, H. Perez-Meana<sup>1,c</sup>, M. Nakano<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Culhuacán

<sup>2</sup> Universidad de Electro-Comunicaciones, Tokio, Japón

<sup>a</sup> mipemol@hotmail.com, <sup>b</sup> nakashika@uec.ac.jp, <sup>c</sup> hmperezm@ipn.mx, <sup>d</sup> mnakano@ipn.mx

**Resumen**— Obtener información musical a partir de grabaciones de audio polifónicas en pistas de audio ha cobrado interés recientemente, por lo cual se han propuesto diversos esquemas, siendo los más eficientes algunos que emplean Redes Neuronales Convolucionales. Este artículo propone un esquema basado en una Red Neuronal Convolutiva (CNN) para la detección y clasificación de eventos sonoros de percusiones en pistas de audio polifónicas tal como el bombo, redoblante y los platillos, lo cual se conoce como Transcripción Automática de la Batería (TAB), esperándose que la transcripción de percusiones mediante estos modelos genere resultados positivos. Resultados experimentales demuestran que, utilizando la misma base de datos, el esquema propuesto proporciona mejoras considerables con respecto a otros esquemas propuestos en la literatura. En adición, para obtener mayor robustez en el sistema, se propone aplicar la función de costo focal en combinación con las funciones de costo previamente utilizadas en la transcripción de baterías.

*Palabras clave.* Aprendizaje profundo, CNN, Transcripción de sonidos

## 1. Introducción

La transcripción de música se define como la habilidad de escuchar una pieza musical, identificar y anotar los diferentes eventos sonoros presentes en la misma. Contar con un sistema que pudiera llevar a cabo esta tarea automáticamente, sería de gran utilidad. Por ejemplo, facilitaría importantemente los sistemas automáticos de recomendación de música basadas en el ritmo e instrumentación, empleados en plataformas de *streaming* musical. Por otro lado, la producción, edición y remezcla de piezas de música se facilitaría al contar con información propia del contenido instrumental y musicológico de las pistas grabadas. En específico, los sistemas ADT sería benéfico en áreas como la educación musical, contando con el monitoreo del desempeño de la ejecución del instrumento.

En caso de las percusiones, al ser estos instrumentos no temperados, la transcripción se reduce a solamente identificar el tiempo de ejecución, así como el instrumento que lo ejecuta. Los primeros aportes de ADT se constituyen de la *representación característica, la segmentación de eventos y la clasificación del evento* [5,6]. A pesar de su simple y eficiente implementación, el sistema muestra poca robustez respecto a grabaciones polifónicas, en especial considerando la intervención de instrumento temperados.

En contraste, las contribuciones del estado del arte han optado por mapear las representaciones características a una función que indica el nivel de actividad de los diferentes instrumentos que componen la batería. Hasta ahora, existen dos

familias de algoritmos de derivación de dichas funciones: algoritmos de factorización de matrices y las redes neuronales profundas. Uno de los sistemas más usados es la Factorización de Matrices No Negativas (FMN) [7-9]. Esta metodología, factoriza la representación del espectrograma de la señal en dos matrices, por medio de un proceso numérico iterativo.

En lo que a las redes neuronales profundas (DNN) respecta, de las primeras aplicaciones en TAB se dio por Vogl [1], utilizando Redes Neuronales Recurrentes (RNN). Posteriormente, variaciones que incluyen Unidades Recurrentes Cerradas (GRU) y celdas de Memoria a Largo-Corto Plazo (LSTM) [1,2], se adhirieron al estado del arte. Otras arquitecturas aplicadas incluyen Las Redes Convolucionales (CNN) y las Redes Convolucionales Recurrentes (CRNN) [2-4].

Los mecanismos de compuertas en las arquitecturas de RNN, han sido factores determinantes en el rendimiento de los sistemas del estado del arte. Tanto las GRU como LSTM, surgieron como una solución efectiva al problema del desvanecimiento del gradiente en arquitecturas profundas. Aun así, las RNN no dejan de ser computacionalmente costosas, esto debido a que entre más secuencias de tiempo se toman por iteración, más profunda se vuelve ésta.

Las CNN, en cambio, destacan en que su implementación es más sencilla, permitiendo así el ahorro de memoria cuando se entrenan. No obstante, son menos propensas a modelar adecuadamente secuencias con una fuerte dependencia temporal. Previamente, se han logrado entrenar RNN tomando diferentes secuencias de tiempo de manera simultánea (como se hace con las CNN) por medio de un mecanismo llamado Atención Suave [3].

Como alternativa, se propone aplicar las Redes Neuronales Convolucionales Cerradas (gCNN). Se ha mostrado anteriormente, que aplicar mecanismos de Unidades Cerradas en las CNN, superan en rendimiento a las celdas LSTM en aplicaciones como el modelado del lenguaje y la separación de fuentes [10,11]. Las gCNN, tienen la capacidad de capturar dependencias temporales, evitando el desvanecimiento del gradiente, y naturalmente entrenarse en paralelo como una CNN convencional. Los resultados muestran una mejora con respecto al sistema de línea base de Red Convolutiva Recurrente con Atención Suave (CNN-SA) propuesto en [3], en casi todos los casos y aún más si se combinan ambos sistemas. También considerando diferentes funciones de costo anteriormente propuestas más allá de los convencionales raíz cuadrática media y entropía cruzada, esto es, las funciones de

costo de múltiples pasos de tiempo [4], se propone aplicar la función de costo focal propuesta en [12]. De igual forma, los resultados favorecen la función focal, y aún más si se combina con múltiples pasos de tiempo.

Siguiendo los aportes más recientes, las percusiones se identificarán en grabaciones polifónicas de un solo canal. Esto implica identificar éstas en presencias de otros instrumentos tanto temperados como no temperados. También se busca abordar tantos estilos musicales como sea posible dentro de la cultura occidental, contando con ello con una basta y variada base de datos de entrenamiento.

El artículo se estructura como sigue: Inicialmente se detalla el trabajo de línea base propuesto en [3] del que parte el proyecto, la sección 3 describe la propuesta, sección 4 consiste en experimentos y resultados. Para finalizar con conclusiones y posibles trabajos a futuro en la sección 5.

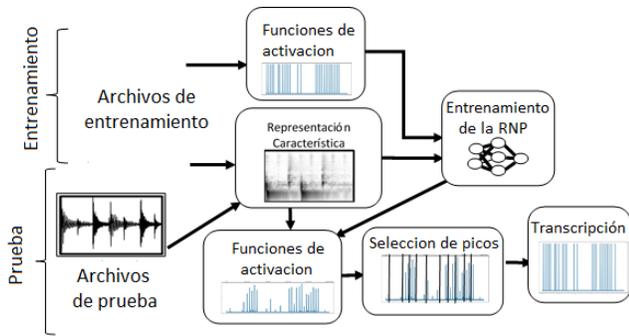


Fig. 1 Sistemas TAB con Redes Neuronales.

## 2. Trabajos Previos

La Figura 1 ilustra un sistema ADT completo que emplea aprendizaje profundo. La red neuronal previamente entrenada, es alimentada con información que consiste en representaciones características de la señal en su forma temporal. La salida de la red consiste en tres funciones de activación para este caso, que corresponden al bombo, redoblante y contratiempo. Estas funciones pasan por un proceso de selección de picos, los cuales evalúan si se llevó a cabo en un intervalo de tiempo la ejecución del instrumento. Las señales de audio de la base de datos son monoaurales y están muestreadas a 44.1 kHz con una resolución de 16 bits. El espectrograma escalado logarímicamente es la representación característica usualmente empleada en los sistemas TAB afines. Cada ventana de la transformada de Fourier toma 2048 muestras, con un solape de la mitad de este valor.

### A. Representación característica de la entrada

Las señales de audio de la base de datos son monoaurales y están muestreadas a 44.1 kHz con una resolución de 16 bits. El espectrograma escalado logarímicamente es la representación

característica usualmente empleada en los sistemas TAB afines. Cada ventana de la transformada de Fourier toma 2048 muestras, con un solape de la mitad de este valor.

Escalar el eje de frecuencia es también conveniente ya que permite ahorrar memoria, y enfatiza el carácter musical de las pistas en cuestión. Por ello, se aplica al espectrograma 12 filtros triangulares por octava de los 20 a 20,000 Hz. Los vectores característicos resultantes son de dimensiones  $84 \times T$ , donde  $T$  es el número de ventanas dividido entre la duración de la señal.

### B. Entrenamiento

Para proveer de funciones de activación apropiadamente, la etapa de DNN es entrenada con datos etiquetados. Para el objetivo de ADT, los datos usualmente se componen de pistas de audio, ya sea de piezas monofónicas o polifónicas en las cuales se ejecutan las percusiones de interés. Para obtener robustez en el sistema se desea que estos datos abarquen diferentes estilos y géneros musicales.

Las piezas musicales están etiquetadas con su correspondiente tiempo de ejecución en cada percusión que se busca detectar y clasificar. A partir de estas etiquetas, se prepara las funciones de activación que servirán como parámetro de error con el cual se medirá el desempeño de la red neuronal durante el entrenamiento. La preparación de las funciones consiste en acomodar tantas tramas como el número de vectores característicos que se obtienen de los datos. A la trama que le corresponde a cada vector característico se le asigna 1 si la etiqueta está presente y 0 en el otro caso. Con la función de activación verdadera  $y_n$ , se mide la distancia con respecto a la predicción de la RNP,  $\hat{y}_n$ .

$$l_{ce}(y_n, \hat{y}_n) = y_n \log(\hat{y}_n) - (1 - y_n) \log(1 - \hat{y}_n) \quad (1)$$

En [4] se modifica (1) para medir la salida de los picos (niveles de salida) en relación con los picos próximos anterior y posterior.

$$l_{pce}^n = \frac{1}{2} (\gamma l_{ce}^n(y_n, \hat{y}_n) + (1 - \gamma)(l_p^n + l_f^n)) \quad (2)$$

Donde  $l_p^n$  y  $l_f^n$ , son la función de costo del tiempo previo y futuro respectivamente, (2) se llama entropía de cruce de picos.  $\gamma$  indica qué tanto se conserva la entropía original respecto a la de picos. Para calcular  $l_p^n$  y  $l_f^n$ , se utiliza la entropía cruzada ponderada:

$$l_{wce}(y_n, \hat{y}_n) = (1 - \phi)y_n \log(\hat{y}_n) - \phi(1 - y_n) \log(1 - \hat{y}_n) \quad (3)$$

Con  $\phi$ , como parámetro de ponderamiento. Esta versión busca detectar con mayor robustez falsos negativos.  $l_p^n$  y  $l_f^n$ , se calculan como sigue:

$$l_t^n = l_{wce}(|y_n - y_{n\pm 1}|, |\hat{y}_n - \hat{y}_{n\pm 1}|) \quad (4)$$

El subíndice  $t$  indica si es tiempo pasado o futuro,  $p$  o  $f$ . Finalmente, la función de costo a derivar  $\mathcal{L}$  durante el entrenamiento es:

$$\mathcal{L}(\theta, \mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{N_{op}} \sum_{i=0}^{N_{op}} l_{ce}(y_n, \hat{y}_n) \quad (5)$$

Y se adaptan los pesos  $\theta$  iterativamente:

$$\theta \leftarrow \theta - \alpha \nabla_{\theta} \mathcal{L}(\theta, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (6)$$

El valor  $\alpha$  en la ecuación 3.10 es el factor de aprendizaje, marca una proporción de magnitud de la actualización de los pesos  $\theta$ .

Unos de los modelos más efectivos de DNN es la CRNN con mecanismo de atención suave [3]. Como puede observarse, primero, se une en serie la arquitectura CNN con la RNN bidireccional (RNNb). Esto permite echar mano de lo mejor de ambos modelos: tanto el entrenamiento en paralelo de la CNN, como el modelado de dependencias temporales de la RNN.

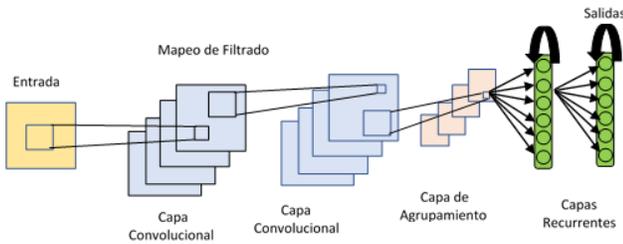


Fig. 2 Red Neuronal Convolutiva Recurrente

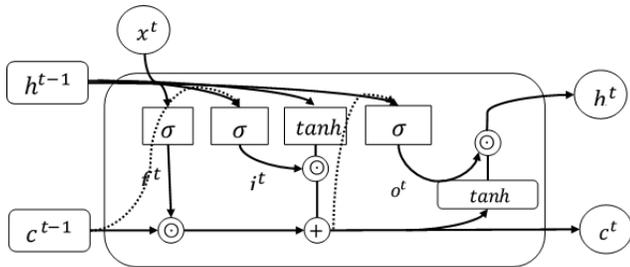


Fig. 3 Representación de una celda MLCP

Las capas de la RNNb, cuentan con celdas LSTM, para evitar el desvanecimiento de gradiente, tal cual como se muestra en la Figura 3. Las celdas están compuestas por una puerta de entrada  $i_t^t$ , una de olvido  $f_t^t$  y una de salida  $o_t^t$ , y sus arquitecturas se define:

$$i_t^t = \sigma(b_{il} + W_{il} \cdot [x_t^t, h_t^{t-1}, c^{t-1}]) \quad (7)$$

$$f_t^t = \sigma(b_{fl} + W_{fl} \cdot [x_t^t, h_t^{t-1}, c^{t-1}]) \quad (8)$$

$$\hat{c}_t^t = \tanh(b_{cl} + W_{cl} \cdot [x_t^t, h_t^{t-1}]) \quad (9)$$

$$c_t^t = f_t^t \odot c^{t-1} + i_t^t \odot \hat{c}_t^t \quad (10)$$

$$o_t^t = \sigma(b_{ol} + W_{ol} \cdot [x_t^t, h_t^{t-1}, c^{t-1}]) \quad (11)$$

$$h_t^t = o_t^t \odot \tanh(c_t^t) \quad (12)$$

Los subíndices en cada una de las ecuaciones, indican que los pesos son propios de cada puerta.  $i_t^t$  modula qué tanta información de la entrada en  $\hat{c}_t^t$  se conserva, mientras que  $f_t^t$  modula a  $c_t^t$ , indicando la información que mantendrá de tramas anteriores.  $\odot$  indica multiplicación elemento a elemento, el operador  $[\cdot, \cdot]$ , denota concatenación y  $\sigma$  es la función sigmoidea.

Inspirado por cómo las CNN cuentan con entradas que se construyen de diferentes secuencias de tiempo apiladas, obteniendo así más información, y detectando patrones de los datos de entrenamiento, en [3] se propone combinar diferentes pasos de tiempo en la última capa de la RNNb, de la forma en que se ve en la Figura 4.

Concatenando las salidas de la última y penúltima capa  $Q = [y_{\bar{L}}, y_{\bar{L}}]$  y  $U = [h_1^{t\rightarrow}, h_1^{t\leftarrow}]$ , se forma una salida  $m$  como sigue:

$$m^i = \tanh(W_Q Q^i + W_U U) \quad (13)$$

El subíndice  $i = t - a : t + a$  indica el paso de tiempo que se va a combinar. Se combinan  $a$  salidas  $m$ , se mandan a una softmax y se retroalimentan con la salida  $Q$ :

$$s^i = \text{softmax}(W_m^T m^i) \quad (14)$$

$$z = \sum_i s^i \odot Q^i \quad (15)$$

Para finalmente mandar la salida a una última capa, obteniendo:

$$\hat{y}^t = \text{softmax}(W_z z + b_z) \quad (16)$$

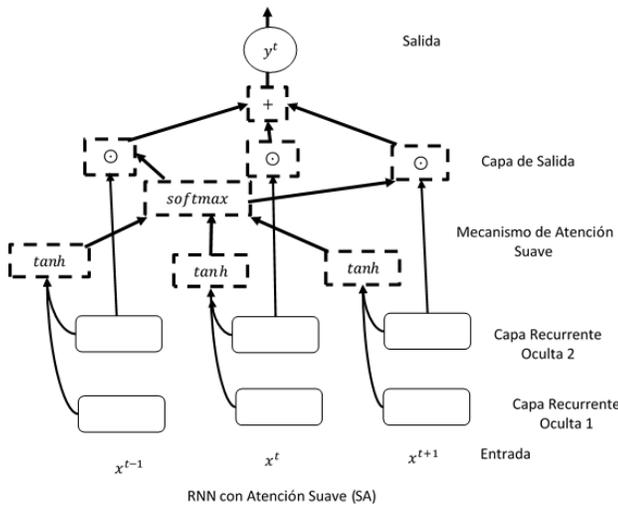


Fig. 4. Ilustración de una red con mecanismo de atención suave, como es propuesto en [3].

El número  $a$  de salidas que se combinan se llama número de atención, el proceso en sí se llama mecanismo de atención suave.  $s^i$  infiere qué porcentaje de información de cada salida  $Q$ , influye en la salida  $z$ .

### C. Selección de Picos

La última etapa del sistema ADT consiste en identificar si el instrumento fue ejecutado, dada la función de activación generada por la red neuronal. En este trabajo, se toma el método propuesto en [3,4]. Este consiste en promediar en una ventana de  $\delta$  valores, para obtener un umbral, por medio de:

$$\tau^t = \text{mean}(\hat{y}^{t-\delta} : \hat{y}^{t+\delta}) \cdot \lambda \quad (17)$$

$$\tau^t = \begin{cases} tmax, & \tau > tmax \\ tmin, & \tau < tmin \end{cases} \quad (18)$$

$$O^t = \begin{cases} 1, & \hat{y}^t > \max(\hat{y}^{t-})\Omega : \hat{y}^{t+}\Omega \text{ \& } \hat{y}^t > \tau^t 0 \\ & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (19)$$

## 3 Sistema Propuesto

El sistema propuesto se basa en las redes convolucionales cerradas cuyas capas de salida de una gCNN, se definen como:

$$H_j = (B_j^f + X^f * W_j^f) \odot \sigma(B_j^g + X^g * W_j^g) \quad (20)$$

La capa de una RNCC es mostrada en la Figura 5, el segundo término de la ecuación 1 es la unidad lineal cerrada (GLU). De la misma forma que una celda de LSTM, una GLU controla información que es transmitida en la red, modulando la proyección lineal  $B_j^f + X^f * W_j^f$  con  $\sigma(B_j^g + X^g * W_j^g)$ . Este

mecanismo permite capturar dependencias temporales en la entrada a largo plazo como lo hace la celda de la LSTM, manteniendo el entrenamiento en paralelo que implica una CNN.

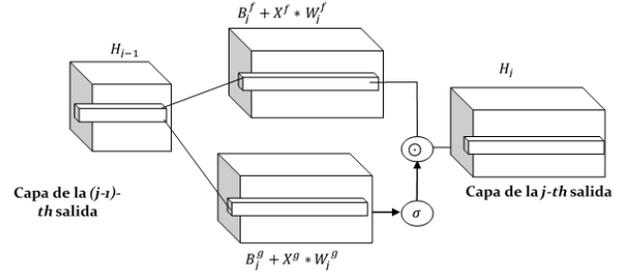


Fig. 5. Arquitectura de una capa de CNN cerrada

Lin en [12], diseña una función de costo que agrega aún más robustez, en especial si en los datos de entrenamiento predominan muchos negativos. Llamada función focal, su definición es como sigue:

$$l_{wce}(y_n, \hat{y}_n) = (1 - \delta)y_n(1 - \hat{y})^\gamma \log(\hat{y}_n) - \delta(1 - y_n)\hat{y}^\gamma(1 - \hat{y}) \quad (21)$$

El valor  $\gamma \in [0,5]$  reduce el costo de salidas correctamente detectadas, forzando al entrenamiento a centrarse en las salidas incorrectas. La Figura 2 se ilustra este concepto con varios valores de  $\gamma$ . Nótese que cuando  $\gamma = 0$  la función es igual a la entropía cruzada convencional, a medida que  $\gamma$  aumenta, el valor de costo de las estimaciones correctamente clasificadas se reduce. Empíricamente, haciendo  $\gamma = 0.5$ , arrojó los mejores resultados. Al igual que en la ecuación (3),  $\delta$  es una constante de ponderamiento.

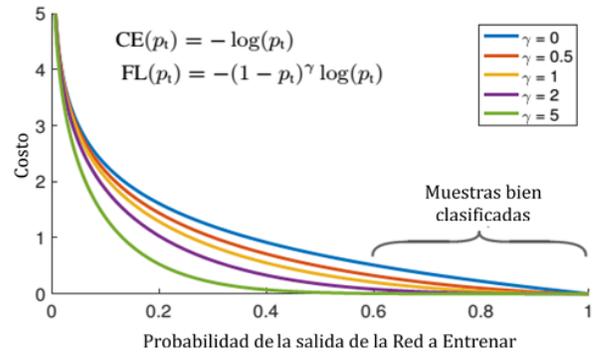


Fig. 6. Función de costo focal vs la probabilidad arrojada por la red. Originalmente empleada para clasificar objetos en imágenes cuyos fondos son predominantes

#### 4. Experimentación y resultados

La base de datos tanto para entrenamiento como para inferencia y validación está disponible en [13], cortesía de Carl Southall, llamada *MDB drums*. Los géneros musicales que principalmente se incluyen son: Pop, Rock, Clásico y Jazz. La base de datos incluye tanto pistas de audio mezcladas como las pistas de los instrumentos aislados. En este experimento se utilizaron las pistas ya mezcladas.

Aprovechando las pistas de los instrumentos aislados, se mezcló con diferentes variedades de los mismos tomando tanto los temperados como no los temperados. Las duraciones de las pistas son en un promedio de 54 segundos. El proceso completo de anotación se muestra en la Figura 7. Como puede verse, la evaluación de la confianza de la anotación también se hizo de manera automática y manual de la base de datos se pre-procesa como se detalla anteriormente.

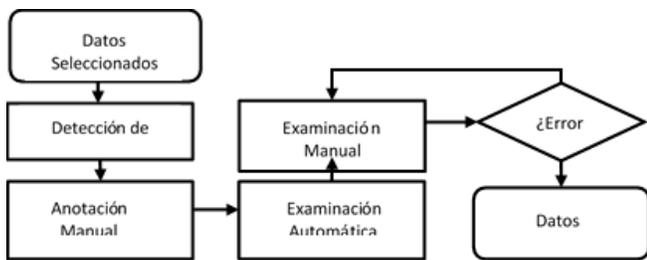


Figura 7. Proceso de anotación de la base de datos MDB drums, propuesto en [17]

Seguidamente, a partir de las tramas de tiempo que se obtienen, se extrajeron 10,000 para el entrenamiento, 1000 para la validación y 1000 para la etapa de inferencia.

El modelo propuesto es implementado en Python, contando con la biblioteca de Tensorflow. La arquitectura toma como entrada las representaciones características de 11 tramas de tiempo. Para la propuesta de este artículo, las capas convolucionadas contienen filtros de dimensiones de 3x3, agrupamiento de máximos de 3x3 y normalización de lotes. La primera capa y segunda capa tienen 32 y 64 salidas respectivamente. La última capa contiene 100 neuronas completamente conectadas, las cuales generan tres salidas con función sigmooidal correspondientes a cada instrumento de interés (bombo, redoblante y contratiempo).

Seguidamente se procedió al entrenamiento el cual se llevó a cabo empleando la variación de gradiente descendente Adam. Con una tasa de aprendizaje inicial de 0.003. Los mini-lotes de entrenamiento consisten en 10 segmentos, construidos con 100 pasos de tiempo, haciendo un total de 1000 pasos de

tiempo. Las condiciones para detener el entrenamiento son: Ya sea, alcanzar 200 épocas o un aumento en la función de costo calculada con los datos de validación.

Otro factor importante son las métricas más usadas, las cuales para el caso de medir algoritmos con salidas binarias, son las llamadas Precisión, Sensibilidad y la medición-F. Un pico detectado que se desvía menos de una determinada ventana de tolerancia de la verdadera salida, se cuenta como real positivo (*tp*). De lo contrario, si el pico no coincide con ningún evento de percusión anotado, es un falso negativo (*fp*). Por otro lado, si la anotación no coincide con ninguno de los picos detectados por el algoritmo, se trata de un falso negativo (*fn*). Con estos conceptos, se calcula la Precisión, Sensibilidad y la medición-F de la siguiente forma:

$$P = \frac{tp}{tp + fp} \quad (22)$$

$$R = \frac{tp}{tp + fn} \quad (23)$$

$$F = 2 \frac{P \cdot R}{P + R} \quad (24)$$

TABLA 1. RESULTADOS DE DIFERENTES ARQUITECTURAS. LA PRIMERA FILA ES LA DE CARL SOUTHALL [REFERENCIA]. LOS MODELOS LETRAS NEGRITAS SON LAS PROPUESTAS EN ESTE ARTICULO.

	Bombo			Redoblante		
	P	S	F-m	P	S	F-m
CNN-SA	0.42	0.45	0.43	0.48	0.63	0.54
<b>gCNN</b>	0.53	0.62	0.57	0.57	0.72	0.64
<b>gCNN-SA</b>	0.65	0.62	0.63	0.55	0.68	0.61
<b>gCRNN-Focal</b>	0.69	0.66	0.68	0.72	0.81	0.76

	Contratiempo		
	P	S	F-m
CNN-SA	0.27	0.57	0.37
<b>gCNN</b>	0.48	0.73	0.58
<b>gCNN-SA</b>	0.53	0.78	0.63
<b>gCRNN-Focal</b>	0.47	0.52	0.50

## A. Resultados

La Tabla 1 muestra la evaluación de los sistemas empleados, en este artículo. Tanto la Precisión, Sensibilidad y la medición-F de los instrumentos bombo, redoblante y contratiempo son incluidos. Como se observa, la gCNN mejoran la propuesta de Southall, en todos los casos. Esto sin la necesidad de recurrir a arquitecturas complicadas. Aun así, el combinar las arquitectura propuestas gCNN y RNN, arrojan mejoras considerables

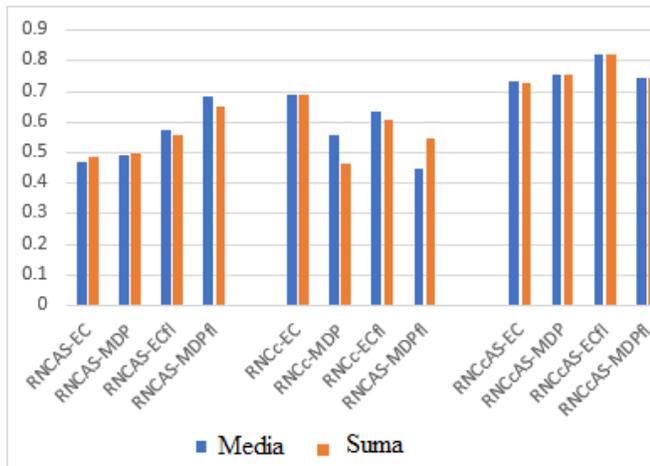


Fig. 8. Medición-F en media y suma para los sistemas propuestos RNCAS, RNCc y RNCcAS. Utilizando cuatro funciones de costo.

La Figura 8 contrasta las diferentes funciones de costo que se emplearon para entrenar los sistemas, con la media y suma de la medición-F. Con excepción de la RNCc, la función de costo focal de entropía cruzada y multi-diferencial ponderada (ECfl y MDPfl), obtuvo mayores resultados. EL sistema propuesto RNCcAS, demuestra ser lo bastante robusto, siendo bastante efectiva independientemente de la función de costo con la que se entrena. Mientras que la propuesta de Southall, también tuvo una mejora bastante positiva con la función focal

## 5. Conclusiones

En la mayoría de la literatura, los sistemas ADT omiten información más dinámica como podría ser el nivel de sonoridad de las ejecuciones, así como su técnica o estilo. En el caso de los sistemas de aprendizaje profundo, estas limitaciones vienen implícitas en la carencia de datos de entrenamiento apropiadamente etiquetados. La otra limitación importante es el número de instrumentos de percusión.

El reto estaría en seguir generando datos de entrenamiento que permitan mayor robustez en los sistemas de transcripción. Lográndose esto ya sea de manera sintética o manual. Combinar el sistema propuesto, puede ser de gran ayuda. Por

ejemplo, la función focal sería de gran contribución. Esto debido a que, como se mencionó anteriormente, la función focal se centra en darle peso a entrenarse contra falsos positivos. Lidiando con la ausencia de más instrumentos ejecutados en los datos con los que se cuentan. Este presenta mejoras a los sistemas ADT que han empleado aprendizaje profundo. Las GLUs demuestran ser bastante eficaces para modelar dependencias temporales al igual que las celdas de LSTM. De la misma forma que con otras aplicaciones como la separación de fuentes, los resultados son superiores. Integrar la arquitectura de gCNN con las RNN demuestra ser la opción más óptima. La función de costo focal también demostró ser una adición con resultados positivos. En general, este trabajo muestra que el potencial de experimentar con las arquitecturas de las redes para mejorar los sistemas ADT es aún un campo abierto a investigación.

## 6. Referencias

- [1] R. Vogl, M. Dorfer, and P. Knees, "Recurrent neural networks for drum transcription," in Proc. Intl. Society for Music Information Retrieval Conf. (ISMIR), New York City, United States, August 2016, pp. 730–736.
- [2] R. Vogl, M. Dorfer, G. Widmer, and P. Knees, "Drum transcription via joint beat and drum modeling using convolutional recurrent neural networks," in Proc. Intl. Society for Music Information Retrieval Conf. (ISMIR), Suzhou, CN, Oct 2017, pp. 150–157.
- [3] Southall, C., R. Stables, J. Hockman, Automatic Drum Transcription For Polyphonic Recordings Using Soft Attention Mechanisms and Convolutional Neural Networks, Proceedings of the 18th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR), 2017.
- [4] C. Southall, R. Stables and J. Hockman, Improving Peak-Picking Using Multiple Time-step Loss Functions, Proceedings of the 19th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR), Paris, France, 2018.
- [5] W. A. Schloss, "On the Automatic Transcription of Percussive Music - From Acoustic Signal to High-Level Analysis," Ph.D. dissertation, Stanford University, 1985.
- [6] M. A. Kaliakatsos-Papakostas, A. Floros, M. N. Vrahatis, and N. Kanellopoulos, "Real-time drums transcription with characteristic bandpass filtering," in Proc. Audio Mostly: A Conference on Interaction with Sound, Corfu, Greece, 2012.
- [7] Chih-Wei Wu and Alexander Lerch. "Drum transcription using partially fixed non-negative matrix factorization with template adaptation". In: Proceedings of the 16th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR). Málaga, Spain, 2015, pp. 257–263.
- [8] Christian Dittmar and Daniel Gärtner. "Real-time transcription and separation of drum recordings based on NMF decomposition". In: Proceedings of the 17th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx). Erlangen, Germany, 2014.
- [9] Clément Laroche, Hélène Papadopoulos, Matthieu Kowalski, and Gaël Richard. "Drum Extraction in Single Channel Audio Signals using Multi-Layer Non Negative Matrix Factor Deconvolution". In: Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). New Orleans, LA, USA, 2017, pp. 46–50.
- [10] Y. N. Dauphin, A. Fan, M. Auli, and D. Grangier, "Language modeling with gated convolutional networks," in Proc. International Conference on Machine Learning (ICML), 2017, pp. 933–941

- [11] L. Li and H. Kameoka, "Deep clustering with gated convolutional networks," in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2018, pp. 16–20.
- [12] Tsung-Yi Lin, Priya Goyal, Ross Girshick, Kaiming He, Piotr Dollár, Focal Loss for Dense Object Detection, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017.
- [17] C. Southall, C. Wu, A. Lerch, J. Hockman, MDB Drums - An Annotated Subset of MedleyDB for Automatic Drum Transcription, Proceedings of the 18th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR), Suzhou, China, 2017.

## 7. Biografías

**Michel Pessat** recibió el título de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica es egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) unidad Zacatenco del Instituto Politécnico Nacional en 2013. De 2014-2016 formó parte del equipo de manejo de audio para el multi-foro Radio Chopo. En 2017, Inició ingresó el programa de Maestría en Ciencias de Ingeniería en Microelectrónica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME unidad Culhuacán. En 2018, tuvo la oportunidad de hacer una estancia en la Universidad de Electro-Comunicaciones en Tokio, Japón, contribuyendo en la empresa Voiceware. En julio de 2019 recibió el grado de Maestro en Ciencias de Instituto Politécnico Nacional.

**Toru Nakashika.** Recibió el título de licenciatura y el grado de Maestro en Ciencias de la Universidad de Kobe en 2009 y 2011, respectivamente. En el Verano de 2010 fue estudiante investigador IBM Research, Tokyo Research Laboratory. De septiembre de 2011 a agosto de 2012 fue investigador visitante en el laboratorio de imágenes en INSA de Lyon in Francia. En 2014 recibió el grado de Doctor de la Universidad de Kobe. De 2014 a 2015 se incorporó como profesor asistente en la Universidad de Kobe. De 2015 a la fecha ha sido profesor asistente en la Universidad de Electro-Comunicaciones de Tokio. En 2013 recibió el IEICE ISS Young Researcher's Award en el campo de voz. El Dr. Nakashika es miembro de la IEEE, IEICE y ASJ.

**Héctor Pérez Meana** recibió el grado de Maestro en Ciencias de The University of Electro-Communications, Tokio Japón, el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica de The Tokyo Institute of Technology, Tokio, Japón, en 1989. Desde marzo 1989 a septiembre 1991, fue investigador visitante de Fujitsu Laboratories Ltd, Kawasaki, Japón. En febrero 1997, se integró como profesor de la Sección de Posgrado e Investigación de Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional (IPN), de la cual actualmente es el Jefe. En 1991 recibió el Premio al Mejor Artículo de IEICE y en 1999 y 2000 el Premio de Investigación del IPN. El Dr. Pérez Meana ha publicado más de 200 artículos internacionales, dirigido 25 tesis doctorales, 37 tesis de maestría y publicado 2 libros entre otros logros académicos. Sus principales áreas de investigación son filtros adaptables, procesamiento de imágenes, reconocimiento de patrones. El Dr. Pérez-Meana es Editor Asociado de la IEEE Latinamerica Transactions, Senior Member del IEEE, Miembro de la IEICE de Japón, del Sistema Nacional de Investigadores de México con Nivel III y de la Academia Mexicana de Ciencias.

**Mariko Nakano** recibió el grado de Maestra en Ciencias en Ingeniería Eléctrica e The University of Electro-Communications, Tokio Japón en 1985, y su Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Ciudad de México en 1998. En febrero 1997, se integró a la Sección de Postgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional, donde actualmente es Profesora Titular C. La Dra. Nakano ha publicado cerca de 150 artículos internacionales, dirigido 15 tesis doctorales y 35 tesis de maestría entre otros productos académicos. Sus áreas de investigación son sistemas adaptables, redes neuronales y marca de agua. La Dra. Nakano es miembro del IEEE, RISP y del Sistema Nacional de Investigadores de México con Nivel II.

# Sistema de Control de Lanzador de Balones Manipulado a Distancia

J. Reyes<sup>1,a</sup>, G. A. Ramírez<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán

<sup>a</sup> [jesus.reyes@live.itsteziutlan.edu.mx](mailto:jesus.reyes@live.itsteziutlan.edu.mx), <sup>b</sup> [gabrielangel.ramirez@live.itsteziutlan.edu.mx](mailto:gabrielangel.ramirez@live.itsteziutlan.edu.mx)

**Resumen**—Esta investigación contempla el diseño de un sistema de control para la regulación de velocidad de lanzamiento y posicionamiento de un mecanismo automatizado lanzador de balones, el cual será manipulado de manera fija por un panel local y remotamente por medio de una aplicación móvil.

Para la implementación del sistema de lanzamiento se realizó el modelado matemático de los motores de corriente continua, para así obtener la función de transferencia de estos, a su vez esta información fue utilizada para el diseño del controlador de velocidad. El diseño y simulación del sistema de control se realizó por medio de software de cómputo. Para la implementación del subsistema de posicionamiento se utilizaron motores a pasos ya que estos permiten un posicionamiento preciso sin la utilización de un sistema de control complejo.

*Palabras clave.* Control, Modelado, Función de Transferencia.

## 1. Introducción

En la actualidad los sistemas de entrenamiento aplicados en deportes de alto rendimiento han tenido grandes cambios en la última década, uno de ellos, es la inclusión de dispositivos que ayudan en la recolección de datos en tiempo real de las condiciones físicas del jugador o dispositivos que ofrecen soporte en los entrenamientos, estos últimos brindan al deportista la posibilidad de realizar repeticiones con las mismas características e incluso para poder practicar en solitario, a pesar de que normalmente este tipo de prácticas requiera de al menos 2 personas.

El objetivo de esta investigación es diseñar un sistema de control para un mecanismo lanzador de balones, el cual deberá dar soporte en los entrenamientos individuales o grupales, además, debe permitir su manipulación fija y remota, dándole al entrenador o jugador cubrir sus necesidades durante el entrenamiento.

El subsistema de lanzamiento está conformado por dos motores de corriente directa que a partir de su velocidad angular determinan la velocidad lineal de salida del balón, por lo cual se implementa un sistema de control de tipo PI para llevar a cabo esta acción, por otro lado para posicionar la dirección y ángulo de disparo se cuenta con dos motores a pasos, los cuales brindaran desplazamientos en dos ejes, esta elección se hace ya que por sus características, los motores a pasos no requieren de un sistema de control sofisticado para ser precisos en sus movimientos.

La manipulación del sistema de lanzamiento se puede realizar desde un panel de control colocado en el dispositivo, aunque para que se puedan aprovechar todas las posibilidades del sistema, el usuario tiene acceso a una aplicación móvil,

desde la cual se tiene el control total del sistema, con opciones de control en tiempo real o bien programando rondas de tiros, todo ello controlando los principales parámetros, como son potencia y dirección del lanzamiento, entre otras opciones que se explicarán conforme se desarrolle este documento.

## 2. Parte técnica del artículo

### A. Función de transferencia

Para que la velocidad del lanzamiento del balón sea la seleccionada por el usuario, de acuerdo a la topología de lanzamiento utilizada en el dispositivo, la velocidad lineal del balón es proporcional a la velocidad angular de los motores de lanzamiento, como lo establece (1).

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1)$$

Donde:

$\omega$ = velocidad angular expresada en rad/s

$v$ = velocidad lineal expresada en m/s

$r$ = radio expresado en m

Entonces para tener el control de velocidad de lanzamiento de los balones se requiere controlar la velocidad angular de los motores, así como también es necesario conocer el radio de los rodillos de lanzamiento que implementa el dispositivo lanzador de balones.

Por consiguiente, en primer lugar, es necesario realizar el modelado matemático de los motores de lanzamiento, éstos al ser iguales, solo se requiere realizar el modelado de uno de ellos. En este caso el motor es de la marca Bodine Electric modelo N4421, cuyas características se muestran en la Fig 1.

Speed (rpm)	Rated Torque (oz-in)	Rated Amp	MP	$k_t$ (oz-in/A)	$k_e$ (V/rpm)	Winding Resistance (ohms)	Winding Inductance (mH)	Rotor Inertia (oz-in-sec <sup>2</sup> )	Radial Load (lbs.)	Length XH (inch)	Wt. (lbs.)	Product Type	Model Number <sup>1</sup>			
													24 Volt Winding	No Acc'y. Shaft	130 Volt Winding	No Acc'y. Shaft
2500	121	6.8	1/4	12	9.2	27	64	0.82	90	6.72	11.3	42ASBEPM	N4421	N4021	-	-

Fig 1. Tabla de parámetros Motot Bodine Electric Modelo N4421

Los datos de interés para el modelado son  $k_t$ ,  $k_e$ , resistencia e inductancia del rotor y la inercia del motor. El modelado se realizó utilizando las unidades del sistema internacional por lo que se realizaron las conversiones necesarias [1].

$$k_t = 0.0847344 N * m \quad (2)$$

$$k_e = 0.0092 v/rpm \quad (3)$$

$$Inercia\ del\ rotor = 0.000579 N * m * sec^2 \quad (4)$$

De acuerdo con (2), (3) y (4) los cuales son datos que proporciona el fabricante y con ayuda de la aplicación Simulink de MatLab, se realiza el diagrama de bloques que representa el modelado de los motores, el cual se aprecia en la Fig. 2, en este se observa el voltaje de alimentación del motor, la parte eléctrica que está compuesta por la resistencia y la inductancia del motor y la parte mecánica definida por la inercia del rotor.

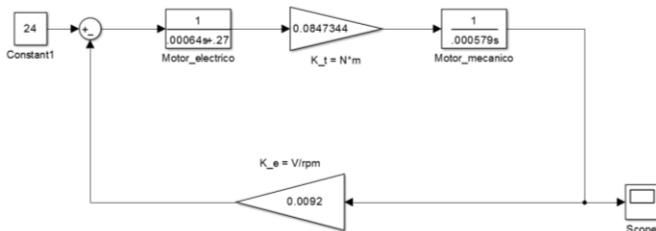


Fig 2. Diagrama de bloques correspondiente al Motor Bodine Electric N4421

Con la finalidad de analizar el comportamiento que presenta el motor, se realizó la simulación del diagrama de bloques anterior obteniendo una señal de respuesta que se ilustra en la Fig 3.

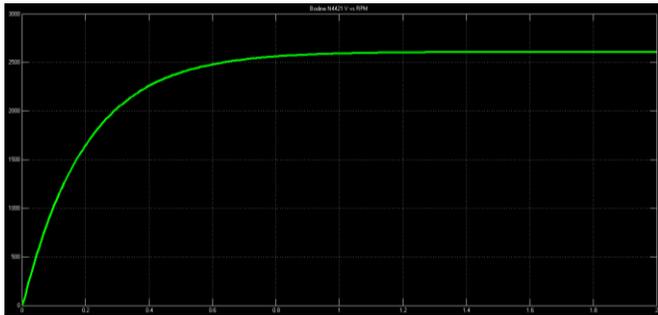


Fig 3. Respuesta transitoria del Motor Bodine Electric N4421

Como se puede apreciar en la Fig 3 el motor presenta estabilidad aproximadamente a los 1.4 segundos, este es el tiempo que le toma al motor alcanzar su velocidad máxima al voltaje nominal de alimentación, en esta simulación el modelado indica una velocidad de 2600 rpm. La simulación del comportamiento del motor se considera válida, ya que los datos del fabricante son una velocidad de 2500 rpm con un voltaje nominal de alimentación de 24 VCD.

### B. Diseño del controlador digital PI

A continuación, se procede al diseño del controlador de velocidad, para esto, se implementó un controlador de tipo PI, ya que por las características del motor de corriente directa seleccionado este controlador es el que arroja los mejores resultados.

Además para brindar una mayor flexibilidad a futuros cambios al sistema de control, se ha decidió implementar un

sistema de control PI digital. Otro de los motivos de realizar un controlador de tipo digital es debido a que la información de la potencia de lanzamiento del balón procede de la aplicación móvil, por lo cual es conveniente que el controlador sea implementado en un sistema embebido. Por ello se agrega un controlador al diagrama de bloques, así como también se realimenta el sistema para obtener un esquema de control en lazo cerrado como se muestra en la Fig 4.

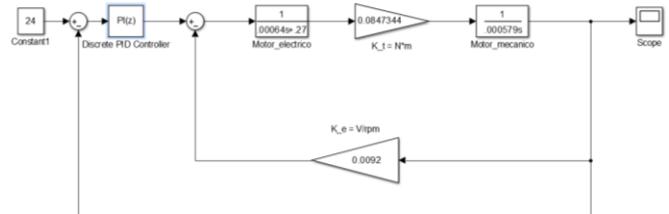


Fig 4. Controlador PI incorporado al diagrama de bloques correspondiente al Motor Bodine Electric N4421

Con la ayuda de la herramienta PID Tuner de MATLAB, es posible obtener los valores aproximados del controlador a implementar, para ello se ajusta la curva de respuesta de acuerdo con los parámetros de respuesta esperados. En la esquina inferior derecha de la Fig 5 se obtienen los parámetros iniciales del controlador, dichos valores son cargados a nuestro bloque del controlador, para simular nuevamente el tiempo de establecimiento del motor con el controlador diseñado.

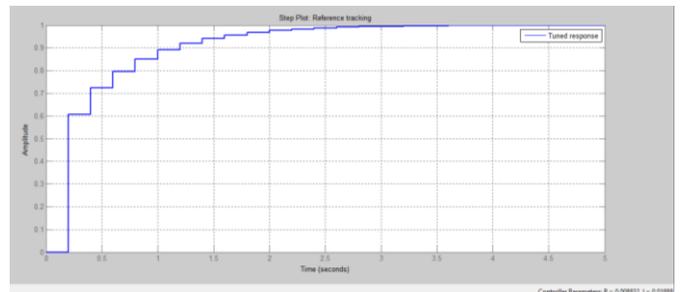


Fig 5. Curva de Respuesta ajustada con la herramienta PID Tuner de MatLab.

Como se puede apreciar en la Fig 6 la respuesta es estable, pero tiene un establecimiento de aproximadamente 2 segundos, lo cual representa un retraso de medio segundo de establecimiento comparado con el sistema en lazo abierto, por esta razón se requiere realizar el controlador e implementarlo para mejorar el tiempo de establecimiento.

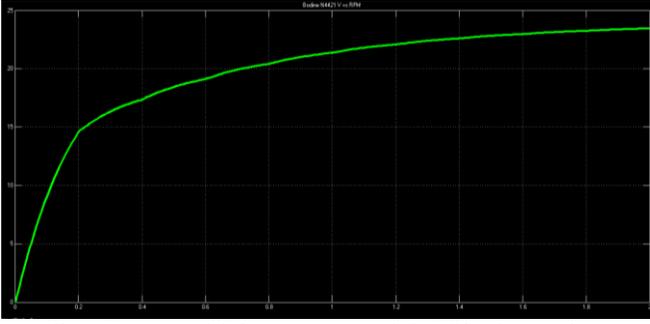


Fig 6. Respuesta del sistema con controlador PI implementado

Para la implementación del controlador se debe considerar el tiempo de muestreo del sistema, y un dato que es de utilidad para establecer el tiempo de muestreo es la constante de tiempo mecánica del motor, esta puede ser obtenida por medio de (5).

$$\tau_m = \frac{R_a J_m}{k_t k_e} \quad (5)$$

Donde:

- $\tau_m =$  constante de tiempo mecánica
- $R_a =$  resistencia de armadura
- $J_m =$  inercia del rotor
- $k_t =$  constante de torque
- $k_e =$  constante de voltaje

La constante de tiempo mecánica  $\tau_m$  determina la rapidez con que aumenta la velocidad en respuesta a un cambio de tipo escalón  $\Delta vt$  en el voltaje terminal, [1]. Por lo anterior se tomará la constante de tiempo mecánica como el tiempo requerido para realizar el muestreo de la velocidad del motor y de este modo dar el tiempo de respuesta necesario al motor ante los cambios de voltaje suministrados. Sustituyendo tenemos que  $\tau_m \approx 200ms$ , por lo tanto, este valor se tomará como el tiempo de muestreo  $T_s$ .

El controlador digital PI tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = k_p + k_i \frac{T_s z + 1}{2 z - 1} \quad (6)$$

Manipulando y convirtiendo a un polinomio en z-1:

$$\frac{2Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (7)$$

Donde:

$$b_0 = 2k_p + k_i * T_s \quad (8)$$

$$b_1 = k_i * T_s - 2k_p \quad (9)$$

para poder implementar la función de transferencia del controlador PI en un sistema embebido se tiene que despejar  $Y(z)$  de (7) como sigue:

$$Y(z) = \frac{b_0}{2} X(z) + \frac{b_1}{2} X(z)z^{-1} + Y(z)z^{-1} \quad (10)$$

La ecuación (10) es de fácil programación, simplemente teniendo en cuenta que el operador  $z - 1$  representa un estado anterior de la entrada o la salida [2].

### C. Programación del controlador

Para la programación del controlador se utiliza un script de MATLAB para que interactúe con el modelado del motor realizado en SIMULINK. Para poder realizar dicha conexión es necesario agregar bloques de entrada y salida de datos al modelado del motor como se muestra en la Fig 7. Además, al ser un controlador digital también se agregan los retenedores de orden cero necesarios [3].

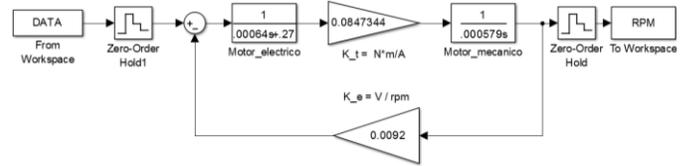


Fig 7. Diagrama de bloques de referencia para la programación del controlador

El diagrama de flujo presentado en la Fig 8 tiene los valores de las constantes  $k_p$  y  $k_i$  del controlador que brindaron los mejores resultados, pero el valor inicial para la sintonización manual fue tomado de los valores que se obtuvieron del PID Tuner.

Se puede apreciar que el sistema de control de velocidad de los motores entrega una señal de tipo PWM, la cual a su vez será aplicada por medio de drivers a los transistores MOSFET de potencia que excitarán a los motores de cd, la frecuencia del PWM se eligió de 20Khz para mantener un balance entre el ruido audible que esta señal pueda generar y la potencia a disipar en los transistores de potencia debida a la conmutación.

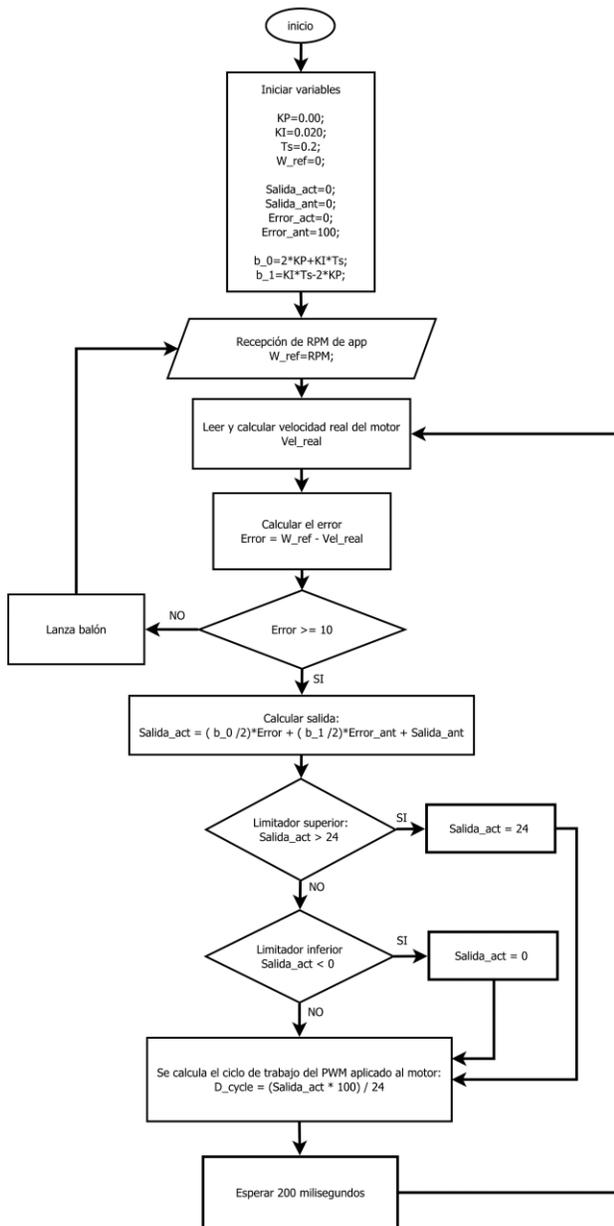


Fig 8. Diagrama de flujo de controlador PI

#### D. Mando de control

Una vez que se obtuvo el controlador para el lanzamiento, se definieron las características necesarias para la manipulación física del mecanismo lanzador de balones, aunque este puede ser aplicado a una gran variedad de deportes se decidió enfocarlo a uno solo, en este caso al fútbol. Dentro de este deporte existen 3 tiros comunes que permiten poner a prueba la eficacia del mecanismo, estos tiros son:

- Tiro penal
- Tiro libre
- Tiro de esquina

Los tipos de tiros mencionados anteriormente son los que se implementaron en el sistema manipulador que se encuentra fijo en el mecanismo, este sistema cuenta con una pantalla LCD de 4 x 20 en la cual se despliega el menú, además de un Rotatory Encoder para permitir la navegación al usuario. El programa de control del dispositivo parte del diagrama de flujo que se muestra en la Fig 9, el cual fue montado en un Arduino UNO. En las funciones referentes a los tiros se realiza la obtención de los parámetros deseados por el usuario, dichos parámetros son la potencia de disparo, distancia, altura y dirección. Con esta información se realiza la conversión para obtener los datos que requiere el sistema de control como la velocidad angular de los motores de lanzamiento o las revoluciones de los motores a pasos dedicados al posicionamiento del sistema.

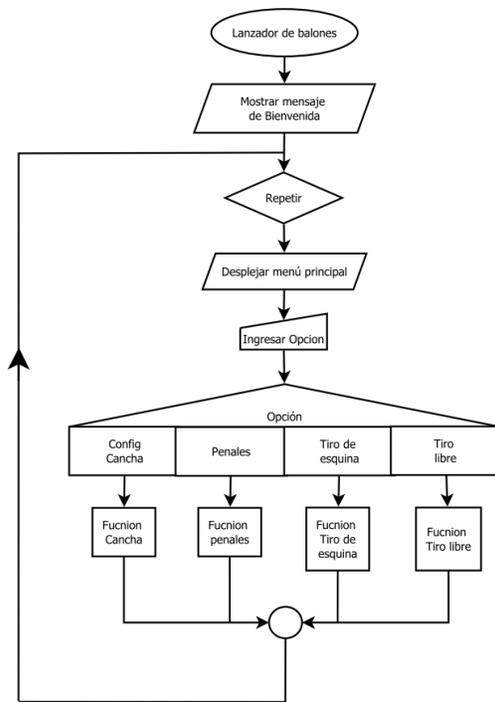


Fig 9. Algoritmo general del sistema manipulador

Para realizar el control del mecanismo de manera remota se utilizó el módulo wifi serial esp8266 con el cual se implementó un servicio web para crear la comunicación inalámbrica entre el Arduino y una aplicación móvil diseñada para el control del mecanismo que le da más libertad al usuario para realizar la selección de tipo de tiro, ya que implementa una miniatura de la cancha y portería elaborada con la información de configuración dada por el usuario. A partir de esta miniatura el usuario puede indicar el lugar donde desea el balón, sin la necesidad de ingresar cada uno de los valores ya que la aplicación realiza un mapeo de las coordenadas seleccionadas por el usuario y realiza las operaciones que se requieren para obtener los datos que serán enviados al sistema de lanzamiento. Estos datos son enviados al Arduino por medio de una cadena

de caracteres separada por comas que contiene los elementos necesarios para activar el mecanismo. Esta cadena de caracteres es analizada por el Arduino en la cual el primer caracter define el tipo de tiro que ha sido seleccionado, a partir de esto el programa reconoce la secuencia de los datos para realizar la conversión y ejecutar la configuración de disparo en el mecanismo para realizar el disparo.

### 3. Conclusiones

El desarrollo tecnológico generado en ésta última década ha propiciado un avance en todos los campos de aplicación de sistemas de control para obtener el mejor rendimiento de dispositivos, dotando de precisión y comodidad en su uso.

El entrenamiento de los deportistas de alto rendimiento no ha sido una excepción, ya que en la actualidad se requiere de herramientas que hagan uso de la tecnología existente, por ello el sistema lanzador de balones objeto de la implementación de control de velocidad desarrollado en la presente publicación, se tiene como resultado que el sistema de control PI presenta la estabilidad requerida en la aplicación, Como se muestra a continuación:

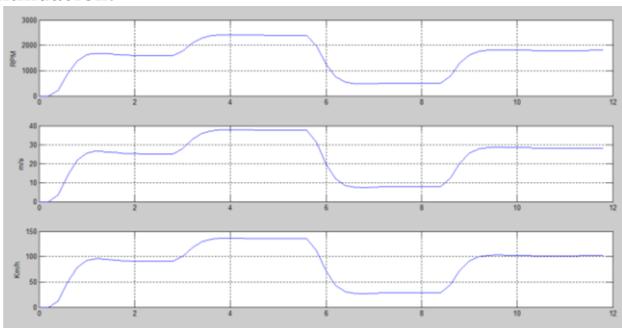


Fig 10. Simulación del controlador PI

La respuesta del sistema de control es de aproximadamente 1 segundo, con lo cual se reduce el tiempo de estabilidad inicial, en las gráficas de la Fig 10 se muestra las RPMs del motor, la velocidad lineal del balón en m/s y la velocidad en Km/h del balón respectivamente, esto con la finalidad de apreciar de forma clara y concisa la velocidad de los motores y su equivalente como velocidad lineal (velocidad del balón). La obtención de la velocidad lineal no sólo depende de la velocidad de los motores, sino que también tiene una relación directa con el tamaño de los discos de lanzamiento, en este caso estos elementos son considerados con un diámetro de 30 cm.

En las gráficas mostradas en Fig 10 se tienen 4 velocidades de los motores de corriente directa, 1600 RPM, 2400 RPM, 500 RPM y 1800 RPM, en las cuales se puede apreciar como la velocidad de lanzamiento del balón se ajusta de acuerdo a lo esperado en los cálculos. De esta manera se concluye que con la implementación del sistema de control PI al dispositivo lanzador de balones el usuario tiene la precisión en los tiros que requiere para su entrenamiento.

Además de que al dispositivo se provee de una aplicación móvil en la cual se tiene el control total del dispositivo, esto da la libertad al entrenador o jugador realizar los tiros en tiempo

real seleccionando posición y velocidad del mismo, o en su caso realizar rondas de tiros predefinidas por el usuario, como también seleccionar una función al azar, todo esto conlleva al dispositivo a ser una herramienta de entrenamiento integral que potencializa la eficacia de los entrenamientos que los deportistas de alto rendimiento requieren.

La mayor ventaja que el sistema automatizado lanzador de balones presenta es que tiene un grado alto grado de innovación, si bien en el mercado existen dispositivos que cumplen con la misma finalidad, en la actualidad no existe ninguno que implemente un control remoto del dispositivo, por ello la implementación de la aplicación móvil brinda un valor agregado y una mayor comodidad en su utilización.

### 4. Referencias

- [1] Mohan, Ned; Undeland, Tore M.; Robbins, William P., "ELECTRÓNICA DE POTENCIA Convertidores, aplicaciones y diseño", Tercera Edición. Editorial McGraw-Hill. México. 2009.
- [2] Ogata, Katsuhiko. "Sistemas de control en tiempo discreto", Segunda Edición. Editorial PRENTICE HALL. México. 1996.
- [3] Simões, M. Godoy; Farret, Felix A., "Modelling power electronics and interfacing energy conversion systems", Primera Edición. Editorial IEEE PRESS. Estados Unidos. 2017.

### 5. Biografías



**Jesús Reyes Gómez** nació en Teziutlán, Puebla el 3 de mayo de 1988. Se graduó del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán como Ingeniero Mecatrónico en 2013. Fue responsable de Laboratorio de electrónica del mismo instituto de 2013-2016. Del 2016 a la fecha se desempeña como profesor adjunto a la división de ingeniería mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán impartiendo clases relacionadas a la electrónica y control, y al mismo tiempo actualmente se encuentra realizando sus estudios de postgrado en Ingeniería Electrónica y Computación en la Universidad Veracruzana.

Áreas de interés: Sistemas embebidos, modelado y control digital, Sistemas electrónicos de potencia.



**Gabriel Ángel Ramírez Vicente** nació en Teziutlán, Puebla el 29 de septiembre de 1991. Se graduó del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán como Ingeniero Mecatrónico en 2014. Laboró en la empresa Margger Ingenieros como ingeniero de mantenimiento en el periodo 2014-2015. Actualmente realiza sus estudios de posgrado en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán, además de ser Profesor adjunto a la División de Mecatrónica del mismo instituto.

Áreas de interés: Visión artificial, Inteligencia artificial, desarrollo de software.

# Control difuso para el seguimiento de trayectorias de un robot móvil de tracción tipo Ackermann

R. Olivera<sup>1-2,a</sup>, E. Escobar<sup>1-2,b</sup>, S. Velazquez<sup>1-2,c</sup>, M. Pérez<sup>1,d</sup>, H. Hernandez<sup>1,e</sup>, R. Carrillo<sup>1,f</sup>, I. Escobar<sup>2,g</sup>, J. Cruz<sup>2,h</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Departamento de Posgrado, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica/ <sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Departamento de Ingeniería Industrial

<sup>a</sup> re.olivera94@gmail.com, <sup>b</sup> enescobarg@ieee.org, <sup>c</sup> sabinovelazquez1@hotmail.com, <sup>d</sup> mperez@ittg.edu.mx, <sup>e</sup> hhernandezd@ittg.edu.mx,

<sup>f</sup> rene.carrillo@ittuxtlagutierrez.edu.mx, <sup>g</sup> esther\_escobarg@hotmail.com, <sup>h</sup> jccd1230@gmail.com

**Resumen**—El presente artículo plantea una alternativa para el seguimiento de trayectorias previamente definidas de un robot móvil de configuración Ackermann (Automóvil), mediante un controlador difuso tipo Sugeno con dos variables de entrada y una variable de salida. Las variables difusas de entrada son: el error de área y el error de distancia lateral; y la variable difusa de salida establecida es el ángulo de orientación del eje delantero del robot móvil. Para el análisis del modelo matemático y la simulación del comportamiento del vehículo o robot móvil, se hace uso de la herramienta CarSim, puesto que permite la parametrización y caracterización del sistema a desarrollar, así como del toolbox de lógica difusa integrado en Matlab®/Simulink. Los resultados obtenidos con el control difuso propuesto se comparan con un control PID para apreciar la eficacia del control difuso, y que permite obtener mejores resultados.

**Palabras clave.** Control difuso, Lógica difusa, Tracción Ackermann, Simulación de sistemas, Seguimiento de trayectorias.

## 1. Introducción

El constante crecimiento de la industria y sociedad han generado una gran cantidad de nuevas necesidades, dentro de las cuales el transporte es uno de los factores en los que más énfasis se ha tenido, pues, además del desarrollo de las necesidades, también se han desarrollado sistemas avanzados en el ámbito tecnológico que permiten mantener gran interés en la robótica móvil terrestre [1], [2], y [3], puesto que desde sus inicios se ha manifestado como una de las ramas de la ingeniería con mayor proyección, esto gracias a que con el paso del tiempo sus aplicaciones han ido diversificándose en ámbitos como: exploración, vigilancia, limpieza, transporte y asistencia médica [4].

El amplio abanico de áreas en las cuales se está dividiendo la robótica móvil y su evolución ha propiciado que se generen nuevas áreas de interés y técnicas de gran impacto para el control de vehículos y dotarlos de autonomía, lo anterior, con la finalidad de que puedan interactuar con el ambiente en el cual se encuentran y satisfacer las necesidades para desplazarse en él [5], para lo cual es necesario incluir la capacidad de asimilar parámetros como reconocimiento y diseño de rutas deseadas.

Dado que en el ámbito de la robótica móvil existen diversos tipos de mecanismos o configuraciones que permiten el desplazamiento del vehículo, es necesario conocer detalles propios del sistema móvil a analizar, tales como: configuración de tracción, dirección y grado de actuación.

Las características citadas anteriormente definen la clasificación del sistema de acuerdo al grado en el cual se puede manipular, puesto que pueden ir desde ser sistemas sub actuados hasta ser completamente no holonómicos, es decir, que tienen menos grados de libertad controlables, algunas de las soluciones para dicha problemática se plantean en [6], [7], [8] y [9].

El diseño de un controlador es un proceso que debe apegarse a las características mecánicas y físicas del sistema que se desea manipular [10] y [11], por tal motivo, es necesario conocer la mayor cantidad de características y variables que influyen en el comportamiento de dicho sistema, así como los aspectos o variables externas que pueden propiciar variaciones en las salidas o respuestas a los estímulos directos a las variables de entrada, en este ámbito la lógica difusa ha representado una alternativa viable gracias a su capacidad para abordar problemas y otorgar soluciones atenuando fronteras [12] y [13].

El presente artículo presenta el desarrollo de un controlador difuso de tipo Sugeno para estimar el ángulo de giro del eje frontal de un robot móvil de configuración Ackermann (automóvil) de acuerdo la variación del error de área y error de distancia lateral a través del tiempo, y la simulación del comportamiento del vehículo estudiado mediante la herramienta CarSim con el uso de parámetros propios de un ambiente real.

## 2. Características del sistema

El presente proyecto se desarrolla en torno a un vehículo de tracción Ackermann de tipo sedán y de clasificación E debido a sus dimensiones, capacidad de carga y potencia.

El robot móvil a emular es analizado mediante la herramienta CarSim y gracias a la amplia biblioteca del software de ayuda se utilizan todas las características propias de un vehículo real, lo anterior con la finalidad de que los resultados obtenidos sean significativos y afines a los que podrían obtenerse si el controlador desarrollado es aplicado en un sistema tangible.

La Tabla I indica las características más significativas del vehículo de tracción Ackermann analizado para el desarrollo del controlador difuso de acuerdo a la variable que se desea controlar.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT MÓVIL (AUTOMÓVIL)

Característica	Descripción
1650 kg	Peso total del vehículo
140 cm	Distancia del eje frontal al centro de masa del vehículo
305 cm	Distancia entre ejes
53 cm	Altura del centro de masa del vehículo
30 cm	Altura de los ejes de ruedas
485 cm	Largo total del vehículo
188 cm	Ancho total del vehículo
148 cm	Alto total del vehículo
225/60 R18	Especificaciones de los neumáticos

### 3. Control propuesto

Una vez definidas las características del robot móvil (automóvil) a controlar, se propone el desarrollo de un controlador difuso de tipo Sugeno, dicho controlador, tiene la finalidad de tomar dos variables de entrada y a partir de ellas estimar una variable de salida, la cual en este caso es el ángulo de giro del eje de las ruedas frontales del vehículo.

#### a. Análisis del comportamiento del sistema.

Para el diseño del controlador difuso se hace uso de CarSim para la simulación del vehículo caracterizado en la sección 2 del presente artículo, lo anterior con la finalidad de identificar cuáles son las variables que influyen en la variabilidad del ángulo del eje frontal del vehículo a medida que este se desplaza a través de una trayectoria previamente definida.

Mediante el análisis del comportamiento del giro del eje frontal del sistema analizado, se determina que el ángulo de giro necesario para el seguimiento de una trayectoria puede estimarse a partir del cálculo de las variables conocidas como: “Error de área” y “Error de distancia lateral”, por lo cual se parametriza un sistema que cuente con estas variables y pueda ser exportado para su análisis en la herramienta Simulink.

**Error de área:** Es el área comprendida en la geometría entre una estación y otra, así como entre la línea de la trayectoria deseada y la línea del desplazamiento real.

**Error de distancia lateral:** Es la distancia perpendicular desde la línea de desplazamiento, hasta la línea de la trayectoria deseada.

El sistema de bloques exportado a Simulink Fig. 1 es sometido a pruebas, en las cuales se hacen variar las entradas “Error de

área” y “Error de distancia lateral” para estimar cual sería el ángulo de giro del eje frontal cuando ambos errores con respecto a la trayectoria definida toman valores diversos.

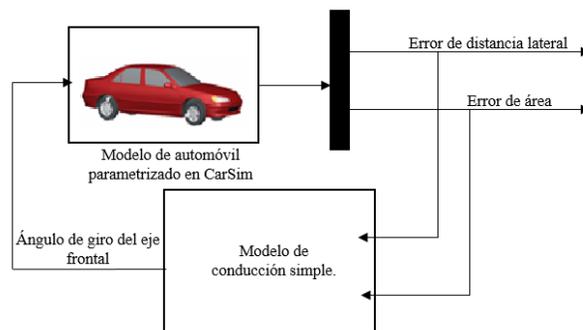


Fig. 1. Diagrama de bloques para el análisis del sistema

Durante el análisis del comportamiento del sistema se muestrean un total de 4000 datos por cada una de las variables de entrada y salida, las cuales sirven para el diseño del controlador difuso y cada uno de los componentes de este.

#### b. Diseño del controlador difuso

Mediante el análisis de los datos obtenidos con la experimentación de las tres variables que conformarán el controlador difuso, se determinan cuáles son los valores mínimos y máximos que pueden tomar cada una de ellas, dichos valores pueden apreciarse en la Tabla II.

TABLA II. VALORES MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE VARIABLES DE INTERÉS.

Valor	Error de área	Error de distancia lateral	Ángulo del eje de ruedas
Mínimo	-3.153050676	-0.865115106	-28.8828692
Máximo	2.531030871	0.716662346	35.79773108

Con ayuda de los datos de la Tabla II se diseña en toolbox Fuzzy Logic Designer de Matlab® el controlador difuso de tipo Sugeno el cual se representa de manera gráfica en la Fig. 2.

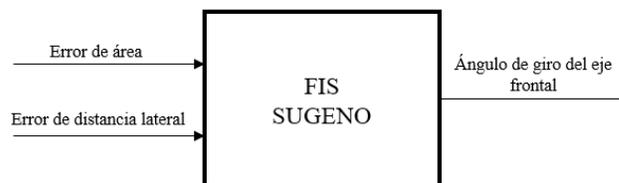


Fig. 2. Estructura del controlador difuso propuesto

El controlador difuso diseñado cuenta con dos variables de entrada, cada una con 5 funciones de membresía, las cuales

asignan a cada uno de los datos de entrada un grado de pertenencia a los conjuntos difusos, dichos conjuntos integran al universo de discurso de cada variable, y cada uno de los universos de discurso está delimitado por los valores mínimos y máximos de la Tabla II.

Las funciones de membresía de cada una de las variables de entrada son de tipo gaussianas y se presentan en las Figs. 3 y 4.

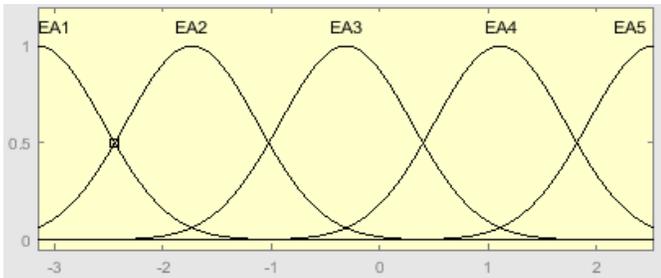


Fig. 3. Funciones de membresía de la variable Error de área

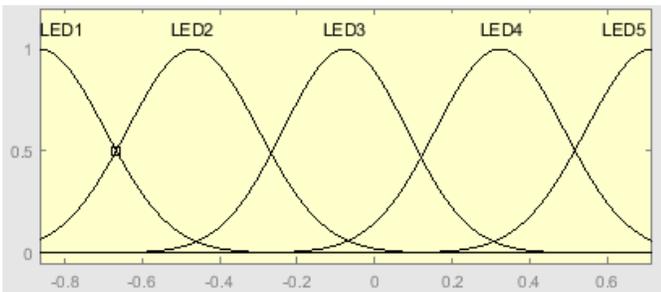


Fig. 4. Funciones de membresía de la variable Error de distancia lateral

Dadas las entradas de las variables “Error de área” y “Error de distancia lateral” se estima la variable de salida mediante un conjunto de reglas difusas que se esquematizan en la Tabla III.

TABLA III. RELACIÓN DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA

Error de área (EA)	Error de distancia lateral (LED)	Ángulo del eje de ruedas (SWA)
EA1	LED1	SWA1
EA1	LED2	SWA2
EA1	LED3	SWA3
EA1	LED4	SWA4
EA1	LED5	SWA5
EA2	LED1	SWA6
EA2	LED2	SWA7
EA2	LED3	SWA8
EA2	LED4	SWA9
EA2	LED5	SWA10
EA3	LED1	SWA11
EA3	LED2	SWA12
EA3	LED3	SWA13
EA3	LED4	SWA14
EA3	LED5	SWA15

EA4	LED1	SWA16
EA4	LED2	SWA17
EA4	LED3	SWA18
EA4	LED4	SWA19
EA4	LED5	SWA20
EA5	LED1	SWA21
EA5	LED2	SWA22
EA5	LED3	SWA23
EA5	LED4	SWA24
EA5	LED5	SWA25

La variable de salida del controlador difuso de tipo Sugeno es de tipo lineal y se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV. VALORES DE LA VARIABLE DE SALIDA

Ángulo del eje de ruedas (SWA)	Valores
SWA1	[0 0 0.02179]
SWA2	[0 0 0.05345]
SWA3	[0 0 0.3006]
SWA4	[0 0 -0.02653]
SWA5	[0 0 2.762e-06]
SWA6	[0 0 0.06386]
SWA7	[0 0 0.02803]
SWA8	[0 0 0.05433]
SWA9	[0 0 0.9542]
SWA10	[0 0 -0.008303]
SWA11	[0 0 1.161]
SWA12	[0 0 0.05104]
SWA13	[0 0 0.001202]
SWA14	[0 0 -0.06333]
SWA15	[0 0 0.3653]
SWA16	[0 0 -0.02129]
SWA17	[0 0 0.3791]
SWA18	[0 0 -0.009485]
SWA19	[0 0 0.1146]
SWA20	[0 0 0.1358]
SWA21	[0 0 4.565e-06]
SWA22	[0 0 0.003225]
SWA23	[0 0 1.117]
SWA24	[0 0 0.9049]
SWA25	[0 0 0.06573]

El análisis de las variables de entrada y la salida generada por el conjunto de reglas difusas pertenecientes al controlador generan una superficie difusa, la cual es la representación gráfica de la interacción entre variables de entrada y salida, dicha superficie es presentada en la Fig. 5.

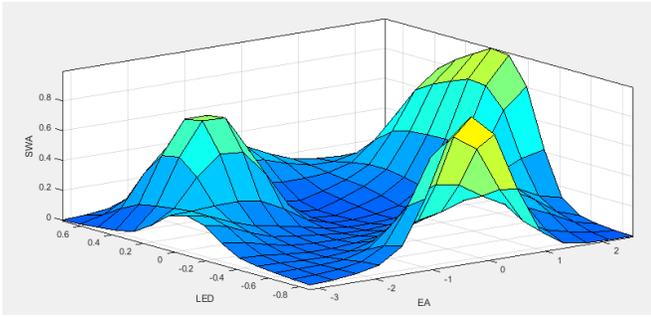


Fig. 5. Superficie difusa de la relación entre variables de entrada y salida

#### 4. Parámetros de simulación

Una vez diseñado el controlador difuso, se procede a realizar la prueba de su funcionamiento, para tal fin se reemplaza el bloque de control de conducción simple de CarSim de la Fig. 1 por el controlador difuso propuesto Fig. 6, se exporta como un archivo de tipo “mdl” para ser simulado en CarSim.

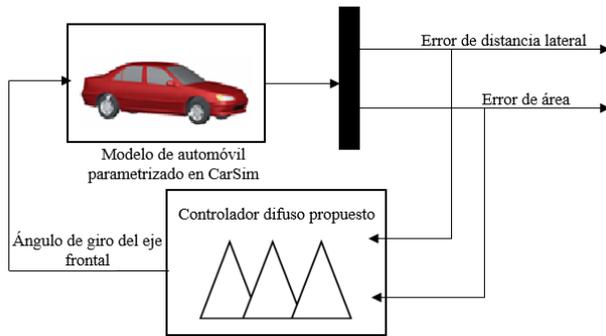


Fig. 6. Diagrama de bloques con el controlador difuso

Para el análisis del funcionamiento del controlador se utiliza una trayectoria diseñada en el software de simulación antes mencionado Fig. 7, la cual cuenta con secciones lineales y curvas, lo cual permitirá evaluar el desempeño del controlador en ambas situaciones.

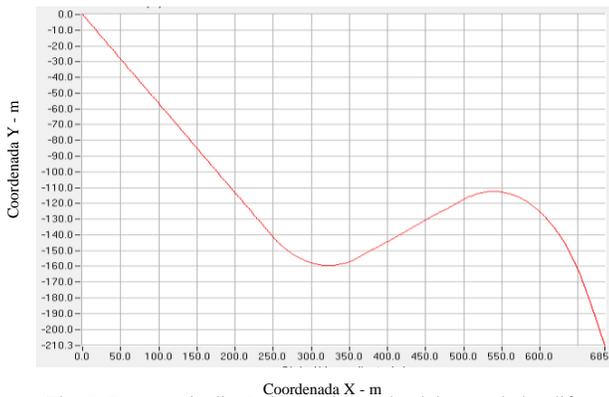


Fig. 7. Trayectoria diseñada para la prueba del controlador difuso

Además de la trayectoria, se definen parámetros para la simulación del funcionamiento del controlador como:

- Condiciones ideales en aspectos del automóvil o robot móvil: Frenos, Aceite, Motor, Neumáticos.
- Control total de la dirección por el controlador difuso propuesto.
- Tiempo de simulación: 40 segundos.
- Velocidad constante: 70 km/h.
- Coeficiente de fricción de carretera: 0.85.

#### 5. Resultados

Una vez exportado el controlador a CarSim se ejecuta la simulación del bloque que contiene integrado el controlador difuso propuesto el cual demuestra una muy buena reacción ante la variabilidad de las entradas como se puede ver en la Fig. 8, la cual presenta la manera en que el ángulo del eje de las ruedas delanteras varía durante los 40 segundos de recorrido en la trayectoria deseada de la Fig. 7.

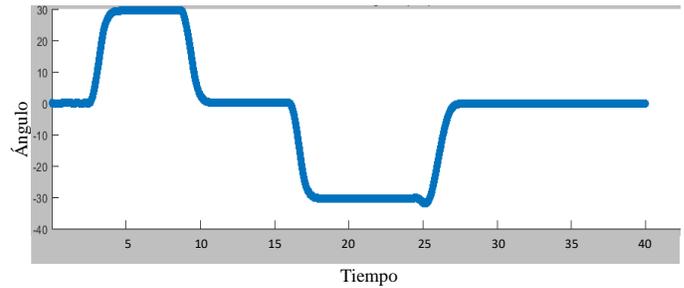


Fig. 8. Variación del ángulo de giro del eje de las ruedas delanteras

De manera adicional al análisis de la variación del ángulo con respecto al tiempo, se analiza la variabilidad de cada una de las variables de entrada “Error de área” y “Error de distancia lateral”, y se grafican con respecto a cada uno de los puntos en los cuales se encuentran los sensores del robot móvil para la simulación (ruedas y centro de masa) Figs. 9 y 10.

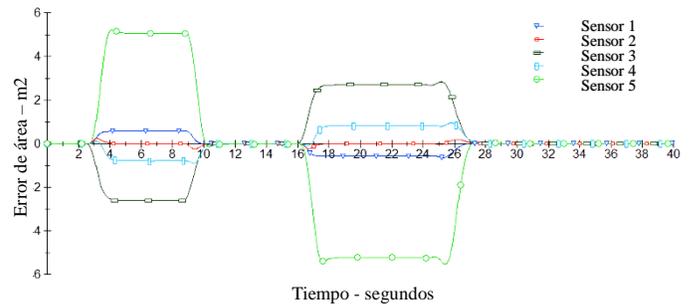


Fig. 9. Variación del error de área

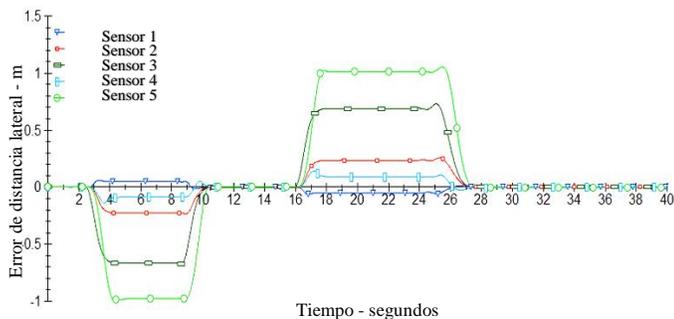


Fig. 10. Variación del error de distancia lateral

Como resultado final se analiza el seguimiento de la trayectoria por el robot móvil de tracción Ackermann durante los 40 segundos de simulación con el uso del controlador difuso, con el cual se obtiene un error promedio de 0.010285% con respecto a la trayectoria deseada, lo cual puede apreciarse en la Fig. 11, esto, mediante la manipulación y optimización de los componentes de las variables que constituyen el controlador difuso diseñado.

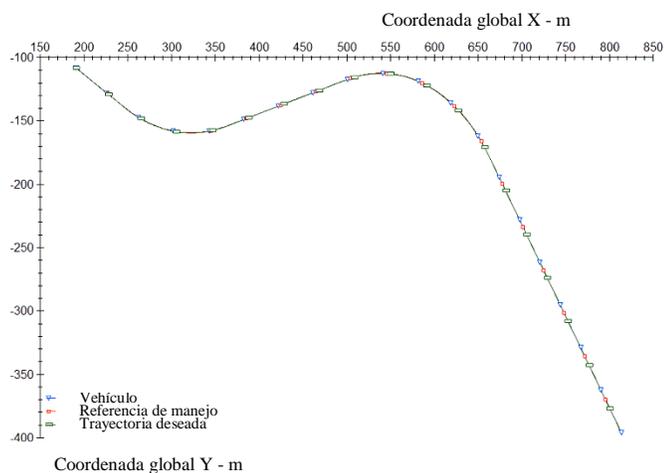


Fig. 11. Seguimiento de trayectoria con el controlador difuso

## 6. Conclusiones

El desarrollo del controlador difuso de tipo Sugeno para la estimación del ángulo de giro del eje de las ruedas delanteras para el robot móvil de configuración Ackermann permite realizar el seguimiento de trayectorias previamente definidas con un grado de error mínimo gracias a la manera en la que se relacionan sus variables de entrada y la de salida.

Si bien el controlador ofrece resultados bastante satisfactorios durante la simulación realizada, es necesario recalcar que existen complicaciones durante su diseño, puesto que la definición correcta de los universos de discurso de las variables

de entrada y salida, así como del número de funciones de membresía de cada una de las variables son los factores que determinan la efectividad del controlador, y la modificación en la amplitud de los universos de discurso, o la adición y resta de funciones de membresía, puede proporcionar resultados diferentes a los del controlador desarrollado en este artículo.

El controlador diseñado puede mejorarse mediante el análisis de otros valores de las variables de entrada y salida, ampliando el universo de discurso de cada una de ellas, y dotando al controlador de la capacidad de obtener resultados significativos ante el diseño de trayectos que impliquen geometrías muy distintas a la que se plantea en esta investigación.

Para la obtención de un parámetro de comparación del controlador desarrollado se desarrolló un PID, el cual arroja resultados con menor exactitud que el controlador difuso, teniendo un error promedio de 0.8013%.

El presente artículo presenta gráficamente la experimentación del controlador con una trayectoria en específico, pero este proceso puede llevarse a cabo y obtener resultados bastante satisfactorios con otras, siempre que la forma de esta no implique giros superiores a los considerados debido a las características físicas del vehículo de análisis.

## 7. Referencias

- [1] Dierks, T., Jagannathan, S., 2007. Control of nonholonomic mobile robot formations: Backstepping kinematics into dynamics. In: Proc. IEEE International Conference on Control Applications. pp. 94–99.
- [2] Yandong, L., Zongyi, W., Ling, Z., 2010. Adaptive neural network pid sliding mode dynamic control of nonholonomic mobile robot. In: Proc. IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). pp. 753–757.
- [3] Shen, D., Sun, Z., Qiao, Y., 2011. Second-order sliding mode control for nonholonomic mobile robots formation. In: Proc. 30th Chinese Control Conference (CCC). pp. 4860 – 4864.
- [4] Rivera, Z. G. F., 2006. Diseño, construcción y control para seguimiento de trayectorias de un robot móvil omnidireccional. Master's thesis, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México D.F., México.
- [5] Bekey, G. A., 2005. "Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control". MIT Press, Cambridge, UK.
- [6] Doh-hyum Kim, Jum-Ho Oh, 1998. "Globally Asymptotically Stable Tracking Control of Mobile Robots". Int. Conf. on Control Application IEEE pp. 1297-1301.
- [7] Kanayama Y, Kimura Y, Miyazaki F, Noguchi T, 1990. "A Stable Tracking Control Method for an Anonomous Mobile Robot". Int. Conf. on Robotics and Automation. pp 384-389.
- [8] Suarez, F., Díaz, E., Velásquez, S., & Velásquez, J., 2018. Control Híbrido PID-Difuso en Robot Seguidor de Línea No Holonómico. Universidad Ciencia y Tecnología, 22(88).
- [9] Fernández, C., Pantano, N., Godoy, S., Serrano, E., & Scaglia, G., 2019. Optimización de Parámetros Utilizando los Métodos de Monte Carlo y Algoritmos Evolutivos. Aplicación a un Controlador de Seguimiento de

Trayectoria en Sistemas no Lineales. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 16(1), 89-99.

[10] Morin, P. and Samson, C., 2008. "Motion control of wheeled mobile robots". Chapter 34 of "Handbook of Robotics", Springer Verlag.

[11] Hernandez Beleño, R. D., Bernardes Vítor, G., Vaqueiro Ferreira, J., & Siqueira Meirelles, P., 2014. Planeación y Seguimiento de Trayectorias de un Vehículo Terrestre con Base en el Control de Dirección en un Ambiente Real. Scientia et Technica, 19(4).

[12] González, J., Gomáriz, S., & Batlle, C., 2015. Control difuso para el seguimiento de guiñada del AUV Cormorán. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, 12(2), 166-176.

[13] Onieva, E., Milanés, V., Pérez, J., & de Pedro, T., 2010. Estimación de un control lateral difuso de vehículos. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 7(2), 91-98.

## 8. Biografías

**Ricardo Enrique Olivera-Palacios** es Ingeniero Industrial, Egresado del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente buscando obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Elías Neftalí Escobar-Gómez** realizó la licenciatura en ingeniería industrial en producción en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez y la licenciatura en ingeniería civil en la Facultad de Ingeniería Civil de la UNACH. El Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba le otorgó el grado de maestro en ciencias en ingeniería industrial, y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial le otorgó el grado de doctor en ingeniería. Es miembro de la línea de investigación optimización de productos y procesos, y de la línea de investigación de sistemas inteligentes en agroindustrias. Actualmente es jefe de proyectos de investigación y profesor investigador del área de ingeniería industrial, profesor investigador de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, y miembro del IISE (Institute of Industrial and Systems Engineers) y del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

**Sabino Velázquez-Trujillo** realizó la licenciatura en ingeniería industrial en producción en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. El Instituto Tecnológico de Ciudad Juárez le otorgó el grado de maestro en ciencias en ingeniería industrial, y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial el grado de doctor en ingeniería. Es miembro de la línea de investigación optimización de productos y procesos, y de la línea de investigación de sistemas inteligentes en agroindustrias. Actualmente es profesor investigador de la maestría en ciencias

en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

**Madaín Pérez-Patricio** es profesor investigador del área de ingeniería en sistemas computacionales, de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro de la línea de investigación de sistemas inteligentes en agroindustrias.

**Héctor Ricardo Hernández-De-León** realizó la licenciatura en ingeniería electrónica en el Instituto Politécnico. El Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (cenidet) le otorgó el grado de maestro en ciencias en ingeniería electrónica, y la Universidad de Toulouse, Francia le otorgó el grado de doctor en ciencias en ingeniería electrónica. Actualmente es profesor investigador del área de ingeniería en electrónica, de la maestría en ciencias en ingeniería mecatrónica y del doctorado en ciencias de la ingeniería en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro de la línea de investigación de sistemas inteligentes en agroindustrias, y miembro honorario del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

**René Carrillo-Pérez-Alfonzo** es Ingeniero en Sistemas Computacionales, Egresado del Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente buscando obtener el grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Irma Esther Escobar-Gómez** es estudiante del noveno semestre de la carrera de Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente participando en un proyecto relacionado con el guiado por medio de visión artificial de un robot móvil en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

**Julio César Cruz-Damián** es estudiante del octavo semestre de la carrera de Ingeniería Industrial en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Actualmente participando en proyectos relacionados con el guiado de robots móviles y la operación de robots manipuladores en el Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Temas de interés, relacionados con inteligencia artificial.

# A 2.5D Visual Servoing Control for a 6DoF Manipulator

Ludivina Facundo <sup>a</sup>, Arturo Baltazar, Chidentree Treesatayapun

<sup>1</sup> Department of Robotics and Advanced Manufacturing CINVESTAV-IPN, No. 1062

Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe 25903, Coahuila, Mexico

<sup>a</sup> lfacundo04@gmail.com.

**Abstract**—The control of industrial manipulators is commonly limited by the closed architecture implemented by providers, allowing the programming of routine tasks to be executed in completely known and structured environments. In this document, a servo visual control strategy for unknown objects location and approximation is presented. The control strategy is intended for autonomous positioning of a manipulator on a determined point of interest over an unknown test object in a semi-structured environment. Segmentation techniques are used to delete objects out of area of interest and for object contour detection with a precision in mm. Image data from an RGB-D camera are used to generate the position commands for the 6 DoF robot manipulator. Experimental results shows the feasibility for autonomous positioning over unknown objects.

**Keywords:** Servo-visual control, segmentation, industrial manipulator.

## 1. Introduction

In most robot control systems, the control algorithms are computed via the use of position and velocity information obtained by sensors located at each robot link (e.g., encoders, tachometers, etc). However, when the robot is operating in an unstructured environment, such sensor information is not always satisfactory. In unstructured environments vision based systems allowing non-contact measurement of the surroundings, similar to human sense of sight, can be utilized to obtain the position information required by the controller. The visual sensor data can be applied for on-line trajectory planning and even for the feedforward/feedback control referred as visual servoing.[1-3]. Visual servoing is an approach to control robot motion using visual feedback signals from a vision system. The objective consists in making the manipulator end-effector follow a specified trajectory to reach a final point in the work space according to [4-6]. The visual servoing system can be classified into two basic schemes, namely position-based visual servoing (PBVS) and image-based visual servoing (IBVS). The PBVS scheme is adopted in the Cartesian space, e.g., position and orientation coordinating with the information of image features and real-time information. The IBVS scheme uses the image signals of feature points without 3-D position and orientation, and the controller is designed in the image plane to drive the feature points to the desired points. In general, the artificial vision devoted to image processing for interpretation purposes is

divided in 7 stages: image acquisition, pre-processing, edge detection, segmentation, feature extraction, object localization and recognition; and scene interpretation. This, overcome the unknown geometrical and surface issue, but is limited for non-contact measurement of the environment. In this work a 2.5D visual servoing using only one camera is presented for unknown object localization and a 6 DoF manipulator approximation. This work is organized as follows. section 2 describes the controlled plant; section 3 presents the designed servo-visual control algorithm; section 4 shows the experimental results and finally, conclusions are given in section 5.

## 2. Controlled Plant

The robotic system to be controlled is presented in figure Fig.1. It is integrated by the KUKA KRC1 controller unit, a 6-DoF robot KUKA manipulator, the test object and an ASUS RGB-D camera. The inverse kinematics controller of KUKA robot is used to control the manipulator by a set of six positioning parameters, that is, three parameters X, Y and Z corresponding to the tool task space configuration cartesian coordinates of the robot, and A, B and C parameters, related to the tool orientation. The servo-visual control provides positioning commands  $u_x$ ,  $u_y$  and  $u_z$  with the coordinates for X, Y and Z parameters of a target object.

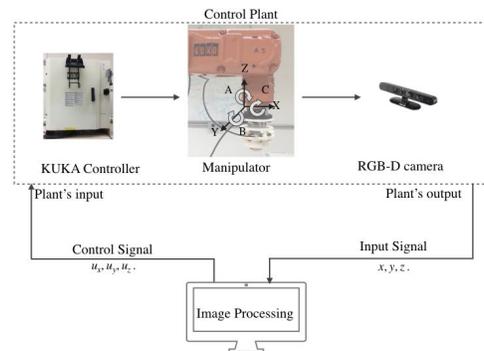


Fig 1. Nonlinear Discrete Time System..

### 3. Control Structure

The servo-visual control is intended to identify the location of an unknown object into a determined task space to command a robotic arm for its positioning. The visual sensing and manipulation are combined in this work as an open loop fashion "looking then moving". The position based control scheme implemented in this work is shown in Fig.2.

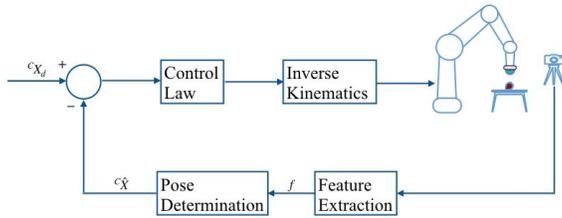


Fig 2. Position based servo-visual control scheme.

#### A. Vision System

The 2.5D vision system used in this work is an RGB-D ASUS XTION PRO camera. The camera is able to provide a depth image which can be transformed into world coordinates. The device has two cameras and one laser-based IR projector. The IR camera and the IR projector form a stereo pair with a baseline of approximately 7.5 cm. The IR projector sends out a fixed pattern of light and dark speckles. The pattern is generated from a set of diffraction gratings, with special care to lessen the effect of zero-order propagation of a center bright dot. Depth is calculated by triangulation against a known pattern from the projector, which is memorized at a known depth. For a new image, it is required to calculate the depth at each pixel. The PS1080 takes the results from the image sensor and determines the differences to generate a depth map. The resolution of the depth map is 1024 by 758 (VGA), but the CMOS sensor has much higher resolution. The captured image by hardware is 1600 by 1200, necessary to provide a depth map. Otherwise, insufficient resolution will not detect changes in the position and size of the projected IR dots. Its depth sensor has an operative range of 0.8 meters to 3.5 meters, the size of the color image is similar to the depth image of 480 x 640 and the speed is about 20 frameworks per second.

#### B. Image Segmentation

Considering works [7-10], the resultant image in (XY,Z) gives distances in millimeters, allowing rotation from camera coordinates to robot coordinates. Then, a translation from camera origin to robot task space origin is performed see Fig.3. All objects out of the defined cubic task space (X=0-700mm, Y=0-700mm, Z=0-300mm) are deleted. Then, a pre-processing step for treatment of images to improve contrast, smoothing,

noise elimination, etc. is used. For edge detection there are different filters, some in frequency domain and others in time domain. The sobel filter was used in this algorithm. After image segmentation, the sobel filter is implemented for contour detection of test objects inside the cubic. Once the objects has been segmented, the object's centroid is estimated as the midpoint in X and Y detected points, finally a key point is estimated in the 20mm over the top surface of the object. The desired position is send to the KUKA controller as a reference value.

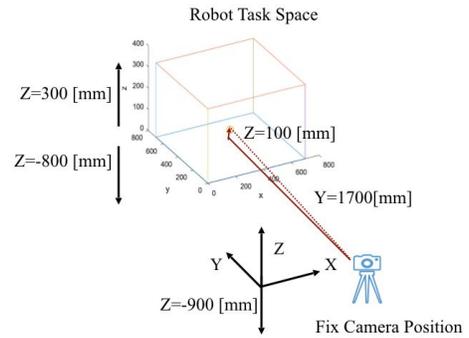


Fig 3. Task Space Configuration.

#### C. Coordinated System Calibration

The robot coordinates are different from task space coordinates. Thus, a calibration to relate both frameworks is required. Line equation is used

$$X_r = k_1(X_{pos}) + k_2, \quad (1)$$

where  $X_r$  and  $X_{pos}$  are coordinates for the same point given by the robot and the camera position respectively, and  $k_1$  and  $k_2$  are the gains that should be determined for each x, y and z coordinates. Two points A and B (see Fig. 4), with different X,Y and Z coordinates are required.

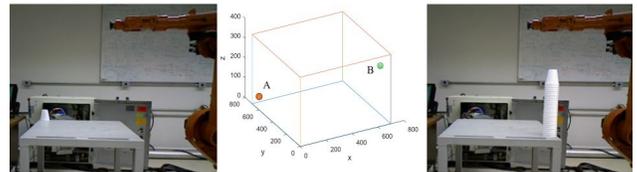


Fig 4. FREN control scheme.

### 3. Results and Discussion

#### D. Preliminary Results from Servo-Visual Control

Fig. 5. shows the experimental set-up and the test object to be located and segmented.

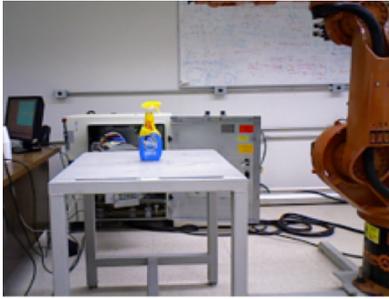


Fig 5. Servo-visual experimental set-up.

Fig. 6, shows successful image segmentation and contour detection. Allowing acceptable measurements of high=278.65mm with an error of 2mm of test object. The upper centroid location of test object was set at  $X=-5$ mm,  $Y=-8$ mm and  $Z=290.1$  and the key point in 20 mm over at  $Z=310.1$ mm (blue diamond).

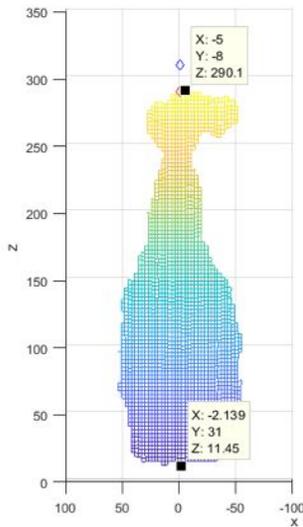


Fig 6. Segmented and filtered object.

#### 4. Conclusions

In this work, a 2.5D position based servo-visual control was proposed for unknown image location and robotic manipulator positioning. The experimental results shown the feasibility of autonomous industrial robot positioning, based only one RGB-D camera information. The servo-visual control allowed unknown object location and acceptable objects dimensioning for a key point determination. The presented work is part of a complete control strategy that will involve, beside servo-visual control for positioning, a force control for soft contact and orientation control for inspections tasks on unknown objects.

#### 4. References

- [1] Türker Sahin and Erkan Zergerglu. "Adaptive 3D visual servo control of robot manipulators via composite cameranputs." Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, 14: 253-266, 2006.
- [2] S. Hutchinson and F Chaumette. "Visual servo control. Part II: Advanced approaches." IEEE Robotics Automation Magazine, 14:109-118, 2007.
- [3] F. Chaumette and S. Hutchinson. "Visual servo control. Part I: Basic approaches. IEEE Robotics Automation Magazine, 13: 82-90, 2006.
- [4] A. Tayebia and S. Islam. "Adaptive iterative learning control for robot manipulators: experimental results." Control Engineering Practice, 14: 843-851, 2006.
- [5] L. Hsu, R. Costa, and F. Lizarralde. "Lyapunov/passivity based adaptive control of relative degree two mimo systems with an application to visual servoing." American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA, June 2006.
- [6] R. Kelly, R. Carelli, O. Nasisi, B. Kuchen, and F. Reyes. "Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems." IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 5:39-48, 2000.
- [7] J. Hosang, R. Benenson, P. Dollár and B. Schiele. "What makes for effective detection proposals?" IEEE Transactions on Pattern analysis and machine intelligence, 38: 814-830, 2016.
- [8] M. Attene, B. Falcidieno, and M. Spagnuolo. "Hierarchical mesh segmentation based on fitting primitives." The Visual Computer, 22: 181-193, 2006.
- [9] G. Koostra, N. Bergström and D. Kragic. "Fast and automatic detection and segmentation of unknown objects." Humanoid Robots, 10th IEEE-RAS International Conference 442-447, 2010.
- [10] Dirk-Jan Kroon. Kinect matlab-file exchange-matlab central. <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30242-kinect-matlab>. [online; accessed July-2019]

#### 5. Biography

**Ludivina Facundo** is a Ph.D. student in Robotic and Advanced Manufacturing Program at CINVESTAV-Salttillo. She received her M.Sc. degree in Physics and Biomedical Engineering from CINVESTAV-Monterrey in 2012. Her research interests include adaptive and learning algorithms for the automation of ultrasonic inspections.

**Chidentree Treeratayapun** received the Ph.D. degree in electrical engineering from Chiang-Mai University, Chiang Mai, Thailand, in 2004. He was a Production Engineer at SAGA Electronics (JRC-NJR) from 1998 to 2000 and was a head of the electrical engineering program at North Chiang-Mai University from 2001 to 2007. He is currently a Senior Researcher with the Department of Robotic and Advanced Manufacturing, Mexican Research Center and Advanced Technology, CINVESTAV-IPN, Saltillo campus, Ramos Arizpe, Mexico. His current research interests include automation and robotic system control and optimization, adaptive and learning algorithms and electric machine drives.

**Arturo Baltazar** is a researcher in the Robotics and Advanced Manufacturing Program at CINVESTAV-Salttillo. He has a Mechanical Engineering Bachelor degree from Universidad Michoacana and received a Ph.D. from Ohio State University. His research is focused on the development of new non-destructive techniques based on ultrasonics.

# Control Difuso de Velocidad de una Turbina Eólica

G. Zubeldía<sup>1,a</sup>, R. Garduño<sup>1,b</sup>, M. Borunda<sup>2,1,c</sup> y M.A. Hernández<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia de Control, Electrónica y Comunicaciones

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

<sup>3</sup> Universidad del Istmo, Instituto de Estudios de la Energía, Tehuantepec, México

<sup>a</sup> gorka.z.e@gmail.com, <sup>b</sup> rgarduno@ineel.mx, <sup>c</sup> monica.borunda@ineel.mx, <sup>d</sup> mahluni2000@yahoo.com.mx

**Resumen**—En este artículo se presenta el diseño de un controlador de la velocidad de giro de un aerogenerador utilizando lógica difusa. El controlador difuso genera las señales de control para establecer la posición angular de las aspas (pitch) del rotor de la turbina eólica, con lo cual se modula la cantidad de energía cinética del viento que es convertida a energía mecánica rotatoria del rotor. El controlador difuso es un sistema difuso tipo TSK que es comparado contra un controlador PI convencional, logrando un mejor desempeño en experimentos de simulación. Además, el rango de funcionamiento del control difuso abarca todo el rango de operación del aerogenerador, desde 0 m/s hasta 30 m/s, con transiciones suaves entre las diferentes regiones de operación.

**Palabras clave.** Turbina eólica, Control de velocidad, Sistema de inferencia difuso, Control difuso de pitch.

## 1. Introducción

Los sistemas de generación eólicos son una solución energética renovable a partir de un recurso abundante y distribuido en el planeta. Esta tecnología ha contribuido a que las energías renovables hayan duplicado su despacho en MW a nivel mundial en la última década [1]. La generación eólica ha pasado de tener 150,096 MW instalados en 2009 a 563,726 MW en el año 2018. Esto responde en parte al crecimiento del consumo energético global, impulsado por una economía global robusta y mayores necesidades de calefacción y refrigeración en muchas partes del mundo [2].

Pesé a la evolución de las tecnologías eólicas de producción de energía, la no linealidad y la variación geográfica y temporal del viento dificultan aún su despacho correcto, esto es, dado que no es posible conocer las condiciones ambientales por anticipado, tampoco es posible garantizar el suministro. La solución actual a esta variabilidad de la energía es diseñar estrategias de control de regulación de la potencia del aerogenerador o inicialmente de velocidad de la turbina.

Este artículo presenta un controlador difuso de velocidad que mejora el desempeño de un controlador PI convencional en cuanto al control de velocidad de un aerogenerador de baja potencia y eje horizontal. En las siguientes secciones se exponen los tipos de generación eólica centrándose en las características de un aerogenerador horizontal y de baja potencia, el proceso aerodinámico, la explicación de las teorías de control y en concreto la regulación de velocidad mediante el posicionamiento de las aspas y finalmente se hace una comparación de resultados obtenidos con simulaciones.

## 2. Aerogeneradores de eje horizontal y baja potencia

Un aerogenerador moderno es una máquina que convierte la energía cinética del viento en energía eléctrica. Gracias a los avances en el diseño de aerogeneradores en las tres últimas décadas, varios conceptos de turbina han sido desarrollados y construidos en vistas a maximizar la energía de salida, minimizar el coste de turbina, e incrementar la eficiencia y la confiabilidad del proceso de conversión. Las turbinas eólicas pueden clasificarse con respecto a diferentes aspectos, entre ellos, la configuración del generador, la capacidad de turbina, la trayectoria del flujo de aire en relación con el rotor de la turbina, el tipo de eje de la turbina, etc. [3]. Basándonos en este último aspecto, la mayoría de aerogeneradores comerciales de hoy en día pertenecen al tipo de eje horizontal, en el que el eje de giro de las palas es paralelo a la superficie de la tierra o en muchas ocasiones paralelo a la corriente del viento. Este tipo de aerogenerador ofrece las siguientes ventajas respecto a uno de eje vertical: a) Alta eficiencia de turbina, b) Alta densidad de potencia, y c) Bajo costo por unidad de potencia de salida.

### A. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal

Un esquema común de componentes de un aerogenerador de eje horizontal se muestra en la Fig. 1. [4], en donde caben resaltar las palas del aerogenerador (1), el equipo para establecer el ángulo de ataque (pitch) de las palas (2), el cubo (hub) que sirve para sostener las palas y la nariz que enfrentan al viento incidente (4). También se muestran las partes más importantes ubicadas en la góndola que serían el equipo para la orientación (yaw) de la góndola (18), los gabinetes de control, protección y eléctrico (13), y el transformador de interconexión a la red eléctrica (14). Además, cabe mencionar a todos los sensores de medición con los que se obtienen las señales que proporcionan el estado físico y operativo del aerogenerador.

Por sus características físicas, los aerogeneradores de eje horizontal cuentan con mecanismos para fijar la orientación de la góndola y el ángulo de ataque de las aspas conforme a los cambios en la dirección y la velocidad del viento incidente. Los sistemas de control generan las señales de comando a los actuadores (motores a pasos) de pitch y de yaw, los cuales establecen la orientación y el ángulo de ataque, y determinan la respuesta dinámica de la turbina.

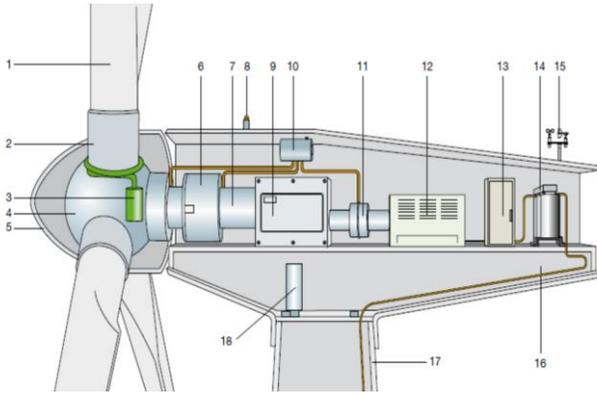


Fig. 1. Componentes de un aerogenerador de eje horizontal

### B. Aerogeneradores de baja potencia

El objeto de estudio es un modelo de aerogenerador tripala de 1 kW [5], cuya curva de potencia se ha utilizado para crear los puntos de funcionamiento en el modelo aerodinámico. La mayor diferencia además de la cantidad de W despachados por un aerogenerador de baja potencia es la velocidad de giro que alcanza para cada valor de incidencia de viento. La velocidad de giro de referencia utilizada para turbinas de este tipo de tamaño ha sido de 400rpm [6], que se ha utilizado como referencia para el sistema de control en la región controlable (una vez alcanzada la potencia nominal). El valor de amortiguación para la generación de una función de transferencia de rotor por tanto se calculó para cumplir con los requisitos de salida y entrada cuantitativos de torque y salida en rpm-s. El valor de inercia (también para la función de transferencia) por su parte, se toma de un estudio que se centra en el valor de inercia en una turbina de similar tamaño [6].

Otro concepto que varía respecto a una turbina eólica convencional de mayor tamaño, es el tip speed ratio o la relación que existe entre la velocidad de giro de pala y la velocidad de viento, TSR, ya que en turbinas de menor potencia (y por tanto tamaño, o radio R) este coeficiente suele ser menor (4) en comparación con las turbinas de mayor tamaño cuyo valor nominal ronda el valor de 7-8. [7]

## 3. Modelo del sistema de conversión de energía eólica

### A. Dinámica del aerogenerador

La dinámica del aerogenerador es descrita por la ecuación de movimiento:

$$J_r \dot{\omega}_r + K_r \omega_r = T_a \quad (1)$$

Donde  $\omega_r$  es la velocidad del rotor,  $K_r$  es el coeficiente de fricción generado por los rodamientos de soporte,  $J_r$  es la inercia del rotor y  $T_a$  es el torque aerodinámico del rotor. Aplicando la transformada de Laplace, la función de transferencia de lazo abierto del rotor es:

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{T_a(s)} = \frac{1}{J_r s + K_r} \quad (2)$$

La energía absorbida por el aerogenerador dependerá tanto de la potencia disponible del viento como de la potencia útil determinada por la limitación de absorción.

### B. Potencia disponible en el viento

Según [3], la energía cinética existe siempre que un objeto de cierta masa posea una velocidad de rotación. Como el modelo del rotor se define a partir de la potencia aerodinámica aportada por el viento, es necesario determinar que la energía cinética de una masa de aire ( $m$ ) en movimiento a cierta velocidad ( $v$ ) se define del siguiente modo.

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3)$$

Por tanto, la potencia, se obtiene derivando la ecuación anterior en el tiempo.

$$P_v = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (4)$$

Entendiendo que el flujo másico se puede expresar mediante la multiplicación de la densidad, el área atravesada y la velocidad a la que circulaba, se tiene que

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5)$$

Y por tanto, siendo circular el área de barrido de las palas:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \quad (6)$$

### C. Potencia útil

La potencia transferida del viento al aerogenerador está limitada por el frenado del aire en la etapa de conversión, siendo la máxima conversión en una turbina ideal del 59% según la teoría de Betz. Las pérdidas en la eficiencia son causadas por el arrastre viscoso en las palas, el remolino causado por el flujo de aire en el rotor, etcétera. De este modo, la potencia útil se calcula considerando las pérdidas al pasar el viento por la hélice,

$$P_{util} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Al final, este efecto se resume con el coeficiente de potencia,  $C_p$ , que depende del ángulo de pala,  $\beta$ , y el coeficiente de velocidad específica,  $\lambda$ , o tip speed ratio TSR [8].

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\left( \frac{c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \quad (8)$$

Esta ecuación se ha adaptado en la práctica para responder a las necesidades de TSR óptimo en turbinas de baja potencia.

En la siguiente gráfica se puede ver como el incremento de pitch reduce los valores de  $C_p$  consecutivamente y para la  $\lambda$  o TSR hay un valor óptimo de relación de velocidad de giro y velocidad de viento. Para regular la potencia absorbida a partir de una velocidad es necesario aplicar un control para limitar la producción de energía a su valor nominal y evitar el sobrepaso para que la turbina rinda dentro de sus límites.

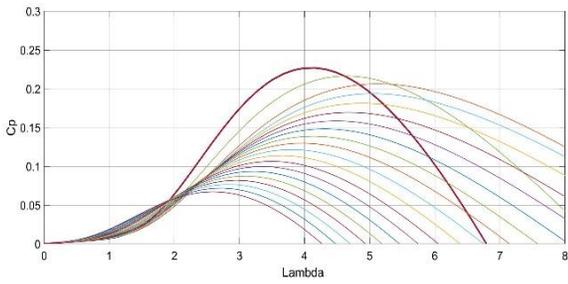


Fig 2. Curvas de  $C_p$  en función del ángulo de pitch.

#### 4. Control de pitch en aerogeneradores

Los aerogeneradores cuentan con un sistema de control alojado en una Unidad Central de Procesamiento que se encarga de recibir todas las variables de estado de trabajo. Información como el voltaje, corriente, temperaturas en puntos de inspección de la góndola, ángulo de paso de las palas, velocidad de viento y de rotación, etcétera, son datos medidos por sensores y enviados a un sistema de control con supervisión y adquisición de datos SCADA.

Una configuración más detallada del control de un sistema de generación eólica puede ser la mostrada en la Fig. 3 [9]. Los algoritmos de control retroalimentados generan comandos de control que serían enviados en este caso a los sistemas SPA, SOG, SESE, CLM y CLR, para controlar la velocidad del generador, la orientación de la góndola, el voltaje en terminales, así como la potencia activa y reactiva generadas.

De la figura anterior hay que tener en cuenta que en el primer caso (el sistema de posicionamiento de pala) se actúa sobre un sistema mecánico y en el segundo sobre un sistema eléctrico, el cual siempre posee dinámicas más rápidas y por tanto la diferencia que se pueda encontrar es que mientras las variaciones del ángulo de pitch pueden ser lentas (debido al tamaño de pala), las variaciones del par eléctrico en el generador son algo más rápidas.

Por ejemplo, un sistema de control podría secuenciar mediciones de velocidad de viento, checar la salud de los componentes del sistema, soltar el freno de mano, implementar ajustes de pitch de pala, y decidir sobre el cierre de contactos

para conectar la turbina a la red [10]. Una turbina no podría producir energía de forma y satisfactoria sin alguna forma de controlar el sistema.

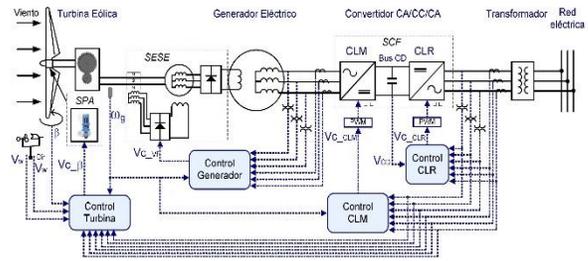


Fig 3. Configuración del sistema de control

#### A. Estrategia de operación

En este caso, el objetivo de control estará enfocado en la regulación de la potencia obtenida por la turbina (lo que en la imagen anterior sería el sistema SPA de posicionamiento de pala, o control de pitch) por lo que es necesario entender como las zonas de regulación establecidas vienen dadas por el comportamiento o curva de potencia del aerogenerador. Por lo general se diferencian distintas regiones de control o actuación que se reparten del siguiente modo [11];

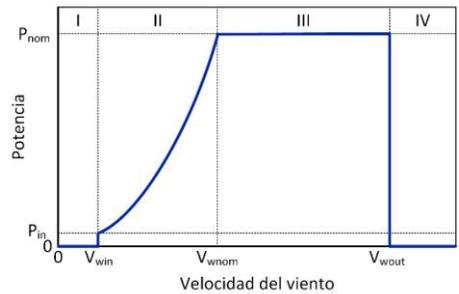


Fig 4. Regiones de operación de un aerogenerador

Esta curva de potencia es característica de cada máquina y se obtiene por los fabricantes según la norma IEC-61400 [12].

Los objetivos marcados para cada zona son distintos en cuestión del control de pitch, ya que cuando el viento empieza a soplar en la región 2 interesa no mover las aspas de su posicionamiento cero y así no crear una resistencia al viento para aprovechar todo el recurso posible. En la tercera región el valor del viento llega a su valor de potencia nominal y es aquí donde entrará el control de pitch para limitar las cargas estructurales ascendentes, pero manteniendo la producción de potencia eléctrica en su valor nominal. Para una última región

de vientos elevados el sistema tendrá que tomar la posición de aspas bandera y entrar en un paro forzado, protegiéndola de cargas aerodinámicas excesivamente altas. Por tanto, el control realizado será el control de pitch para vientos de la región 2.

Del control de pitch cabe mencionar que no solo se regula el posicionamiento de aspa para conseguir ciertas eficiencias de conversión energética, sino que también sirve como sistema de seguridad en caso de emergencias o vientos altos incontrolables. Respecto a su funcionamiento requiere de baterías de back up o equipos de almacenamiento mecánico para seguir operativo en caso de fallo en la conexión con la red mediante la cual se alimenta. En la industria de la energía eólica moderna el sistema de posicionamiento de pitch puede ser eléctrico o hidráulico según la adecuación de cada modelo, y cada aspa dispone de su sistema independiente de posicionamiento.

### B. Control PI convencional

El controlador convencional o controlador PID es ampliamente utilizado en relativos a aspectos industriales por su estructura simple, fácil implementación y caracterización robusta. De hecho, es el esquema de control más ampliamente utilizado, siendo la estimación de lazos PID empleados a nivel industrial del 90% del total. El esquema de control típico es el siguiente [13].

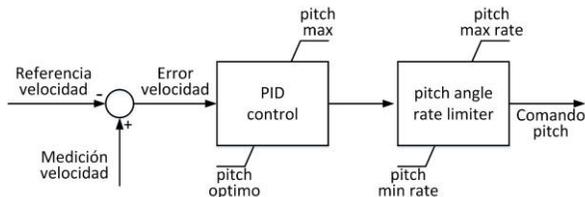


Fig 5. Esquema de control de pitch convencional

En nuestro caso el sistema se referiría al modelo de la planta eólica y el elemento actuador sería el motor a pasos que lleva al aspa a la posición deseada. La retroalimentación hará referencia a la medición dada por los sensores cuando la planta ha recibido esa perturbación por la señal de control.

En el estudio concreto se ha optado por un controlador PI, cuya salida se puede representar de la siguiente forma:

$$SC = K_p e + K_i \int_0^t e \quad (9)$$

El incremento del factor proporcional estaría ligado a la reducción del error de estado estacionario y mejora de exactitud, mientras que el factor integral se usa generalmente para eliminar el error de estado estable para asegurarse que no haya errores de seguimiento.

De este modo, se puede pensar que a medida que la variable de viento cambie, la turbina estará trabajando en otro punto de funcionamiento por lo que las ganancias ( $k_p$  y  $k_i$ ) del controlador tendrían que rediseñarse para mantener la estabilidad y la respuesta dinámica del sistema. Por otra parte, el controlador PI tiene carencias para presentar soluciones en los puntos de transición, como puede ser el cambio que se da al terminar la zona de control y pasar a una zona de viento mayor con necesidad de control de potencia.

A priori, la utilización de un control difuso permitiría el diseño de un controlador sin necesidad de conocer la máquina en profundidad y solo basado en las características de su curva de funcionamiento, y además es de esperar que, si se utiliza un controlador difuso en el que se definen las reglas adecuadas que sirvan para todas las zonas de funcionamiento, en control en la zona de transición proporcione mejores resultados. En este caso se ha diseñado un controlador difuso que se comportase como un controlador PI para cada zona. La estructura básica de un controlador de lógica difusa suele seguir el siguiente esquema [14]

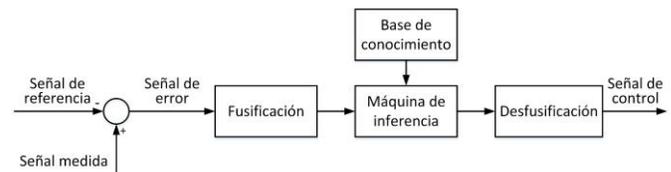


Fig 6. Esquema de control difuso

La base de reglas es la parte de la arquitectura del sistema de control difuso donde se almacena el conocimiento en forma de reglas. Un ejemplo de una de estas reglas sería:

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ y } y \text{ es } C, \text{ ENTONCES } z \text{ es } F \quad (10)$$

En cada instante discreto, el mecanismo de inferencias puede activar una, varias o ninguna de las reglas. El diseño del control difuso empieza por la parte de fusificación, la cual permite asociar a un valor numérico un conjunto difuso, asignándole un grado de pertenencia según un término lingüístico a partir de la función de pertenencia. Estas funciones de pertenencia pueden tomar diversas formas como pueden ser triangulares, gaussianas, trapezoidales, etc.

Los dos tipos de sistemas de inferencia difusa más usados son los métodos de Mandami y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) [15], siendo esta última la forma que se adopta en este estudio. La principal diferencia que presenta el método TSK respecto al de Mandami es que no es necesario realizar un proceso de desfusificación. Esto se debe al hecho de que no obtenemos ningún conjunto difuso sino un conjunto de funciones lineales.

Así, en el método TSK podemos obtener directamente el valor de salida de sistema con una expresión del tipo:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (11)$$

Donde el valor  $\omega_i$  se obtiene calculando el mínimo de los valores de entrada en cada regla  $R_i$ , [15]

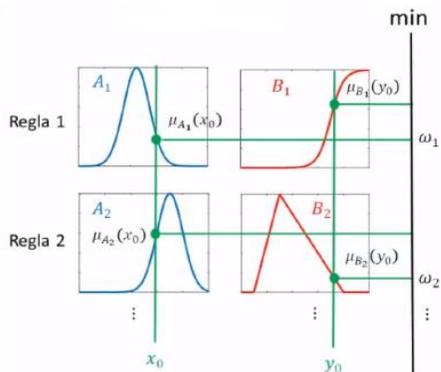


Fig 7. Cálculo del valor  $\omega_i$

### 5. Control difuso de pitch

El controlador difuso es del tipo TSK con 3 variables de entrada y una de salida. Las variables de entrada son el error entre la velocidad de giro medida y la deseada (ERROR), la integral del error (IERROR), y la velocidad de viento (VIENTO), precisamente para establecer un funcionamiento distinto para rangos diferentes de viento y así actuar de forma más detallada. Las funciones de pertenencia utilizadas para fuzzificar cada señal son las siguientes. Para la señal ERROR se proponen 3 valores lingüísticos: error negativo (EN), error cero (EC) y error positivo (EP), como se muestra en la Fig. 8. Para la señal IERROR se han utilizado también 3 valores lingüísticos: integral negativo (IN), integral cero (IC) e integral positivo (IP), como se muestra en la Fig. 9. En cuanto a la señal VIENTO se definieron 6 valores lingüísticos: velocidad baja (B), velocidad de transición (T), velocidad alta pequeña (AP), alta media (AM), alta alta (AA) y muy alta (MA), como se muestra en la Fig. 10.

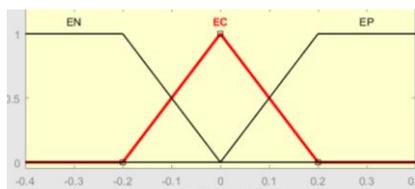


Fig 8. Valores lingüísticos del error E

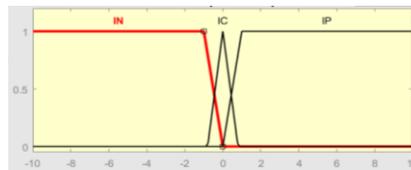


Fig 9. Valores lingüísticos de la integral del error IE

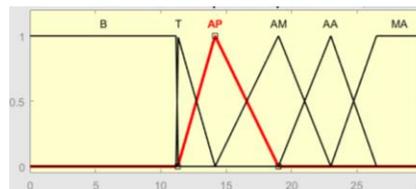


Fig 10. Valores lingüísticos de la velocidad del viento Vv

El diseño toma esta forma peculiar alrededor del valor 11 para expresar la necesidad de un conjunto difuso para la zona de transición (del no-control a la zona de control), siendo el dominio de la zona baja limitada hasta ese punto de transición.

La importancia de crear una variable de entrada correspondiente a la velocidad a la hora de diseñar el controlador viene de la relación directa que tiene esta variable con la velocidad de giro de salida en la cuestión de comportamiento de la turbina. Si se consigue cambiar la señal de control (que incidirá en el pitch) respecto a las velocidades de entrada del viento, se estará actuando en dicha proporción para el output de velocidad de rotación del aerogenerador, es decir, se podrá manipular la velocidad de salida directamente.

Para la salida se han establecido 6 funciones distintas en función de lo adecuado que resultasen los parámetros de control  $k_p$  y  $k_i$  establecidos. Para esto se probaron rangos de viento en el PI convencional encontrando así valores de  $k_p$  y  $k_i$  distintos a medida que el rango de velocidades variaba. El rango de velocidades de viento que se ha establecido y las variables lingüísticas asignadas son los siguientes:

TABLA I. RANGOS DE VELOCIDAD DE VIENTO Y SUS CARACTERÍSTICAS COMO VARIABLES LINGÜÍSTICAS

VL	Vmin	Vmax	Tipo	Parametr
B	0	11.3	Trapezoidal	[0 0 11.3 11.3]
T	11.3	14.15	Triangular	[11.3 11.3 14.15]
AP	11.3	17	Triangular	[11.3 14.15 19]
AM	17	21	Triangular	[14.15 19 23]
AA	21	25	Triangular	[19 23 26.5]
MA	25	28	Trapezoidal	[23 26.5 30 30]

Por lo mencionado en el apartado de rangos de control, la principal función del controlador debe ser garantizar que la turbina eólica siga la señal de referencia de velocidad de rotación, es decir, la potencia nominal, una vez que llegue a la velocidad nominal de viento. Para la zona baja, el objetivo del

control será crear una señal de control de valor nulo con el fin de capturar toda la energía proveniente del viento hasta su valor nominal. Las reglas en el diseñador del control sugeno en Simulink se han relacionado mediante 54 consecuencias. La estructura de las reglas es la siguiente:

$$Si (Vw \text{ es } B \text{ y } E \text{ es } N \text{ y } IE \text{ es } C), \text{ entonces } SC \text{ es } B \quad (12)$$

Hay que tener en cuenta que la salida de este control, al tratarse de un tipo TSK o sugeno, es un valor numérico y no una variable lingüística, por lo que los nombres que se le hayan dado a las funciones de salida son para nombrarlos y no para referirse a una variable lingüística. La forma o la dinámica que compone la salida SC son del siguiente modo:

$$SC = K_p \cdot E + K_i \cdot IE + K_o + K_v \cdot V_w \quad (13)$$

Teniendo en cuenta esta ecuación los valores asignados a cada rango de la variable de salida SC son los que se muestran en la Tabla II. Por tanto, la salida solo tendrá la misma cantidad de rangos separados para la velocidad de viento, y así dependerán los valores kp y ki en su totalidad del rango en el que se encuentre la velocidad de viento, habiendo diseñado de esta forma un controlador difuso que centra toda su atención en las etapas del viento, introduciendo salidas diferentes según las necesidades de cada una de las zonas.

TABLA II VALORES CONSTANTES DE LA SEÑAL DE CONTROL POR RANGOS

SC	Kp	Ki	Ko	Kv
B	0	0	0	0
T	0.05	0.17	0	0
AP	0.05	0.17	0	0
AM	0.03	0.13	0	0
AA	0.02	0.09	0	0
MA	0.015	0.06	0	0

## 6. Experimentos de simulación

Para la comparación de ambos controles mediante simulación, se han corrido las simulaciones para un viento incidente ascendente desde el valor de 4m/s hasta un valor que el controlador aceptase. La consigna de referencia del control se ha establecido en 400 rpm (valor nominal de giro en los que se quiere mantener la turbina para una extracción de potencia nominal) para la zona de control, dejando la zona previa o la zona de no-control con una entrada de pitch 0 directamente en el caso del PI y en manos de la base de reglas en el caso del controlador difuso. Los valores del constante proporcional e integral utilizados en el controlador Pi han sido 0,6 y 0,5 respectivamente, mientras que los valores por zonas en la lógica difusa han sido las mencionadas en el apartado anterior.

Con estos criterios de simulación, los resultados obtenidos para el controlador difuso han sido los siguientes (Velocidad de giro Wr, potencia mecánica Pm, torque mecánico Tm,

Factor de potencia Cp, Tip speed ratio o Lambda H y el valor de pitch B respecto a la velocidad de viento incidente)

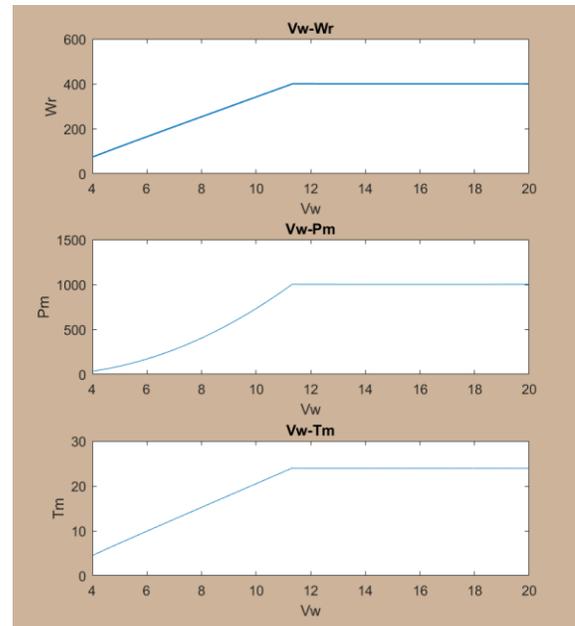


Fig 11. Wr, Pm y Tm con el controlador difuso de velocidad

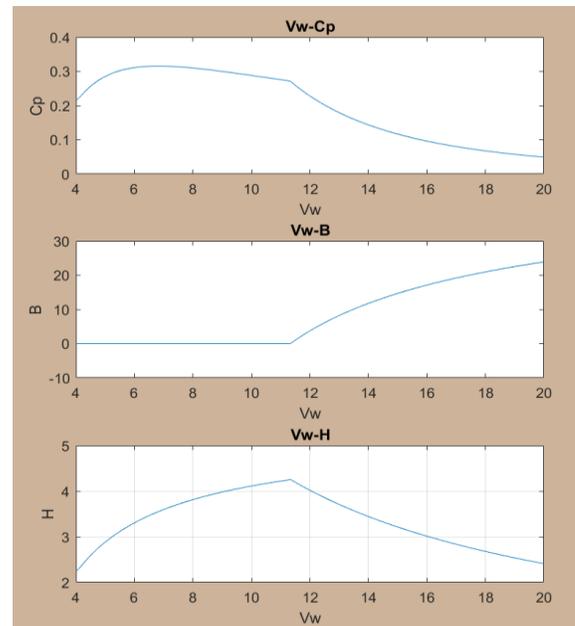


Fig 12. Cp, B y H con el controlador difuso de velocidad

El controlador como cabía esperar mantiene un pitch nulo hasta el punto de inflexión (11.33) donde la velocidad de giro llega a la consigna y de ahí en adelante el valor de pitch incrementa debido a la señal de control que así lo exige, para mantener el valor nominal en los vientos de valor ascendente.

Para el caso del controlador PI, y para las mismas variables se tienen las gráficas de las Figuras 13 y 14. A priori, los resultados obtenidos en ambos casos son semejantes y el comportamiento correcto. Sin embargo, se puede ver como la simulación ha dejado de correr en vientos superiores a 18.

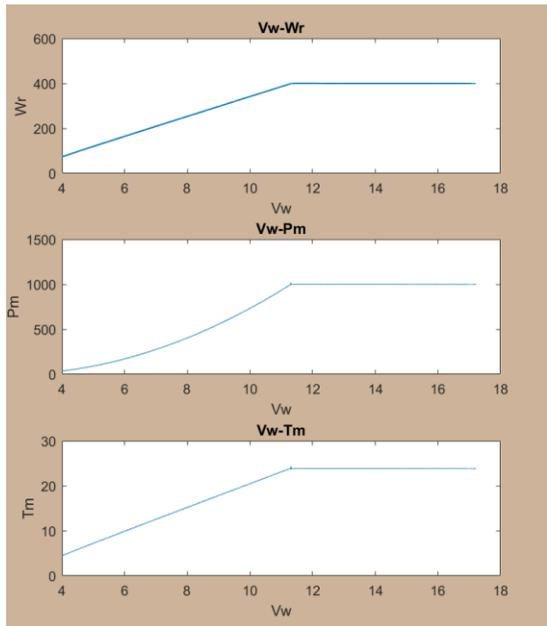


Fig 13.  $W_r$ ,  $P_m$  y  $T_m$  con el controlador PI convencional de velocidad

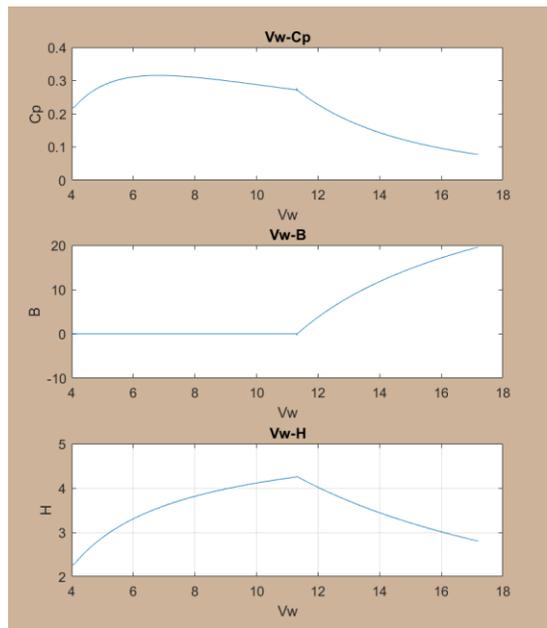


Fig 14.  $C_p$ ,  $B$  y  $H$  con el controlador PI convencional de velocidad

Por lo tanto, el controlador difuso ha sido capaz de controlar en un rango más amplio. Además, en el punto de transición el

controlador PI ha dado un pico que en la escala graficada no llega a apreciarse del todo, pero que analizando la señal control ante una perturbación de entrada se puede ver fácilmente. Si consideramos un escalón en el viento incidente de 11.33 m/s a 12 m/s, la salida de la señal de control de los dos controladores se muestran en las Figuras 15 y 16. Ante una perturbación de entrada la señal de control del PI no es tan precisa como en el controlador difuso y por tanto la transición se nota más brusca.

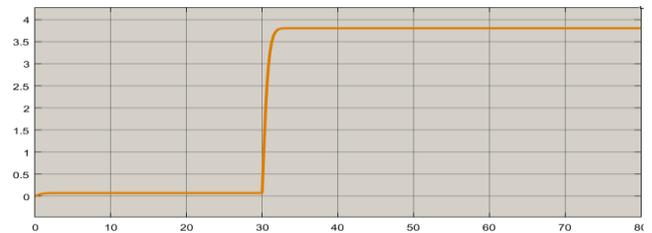


Fig 15. Señal de control generada por el controlador difuso para un escalón en la velocidad del viento

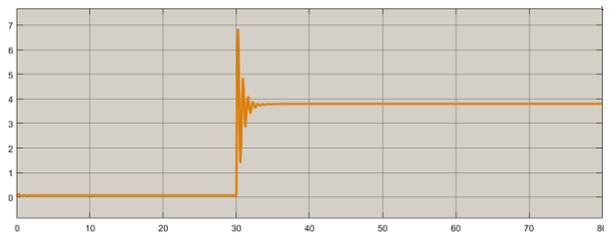


Fig 16. Señal de control generada por el controlador PI para un escalón en la velocidad del viento.

## 7. Conclusiones

Con base en lo observado en las simulaciones, el control difuso presenta ventajas respecto al control PI convencional. Responde mejor en las zonas de transición donde el PI presenta cambios bruscos y oscilaciones en la señal de control creando picos no deseados en la potencia de salida. La respuesta con el controlador difuso ha sido rápida y exacta. Se muestra que el controlador difuso puede abarcar todas las zonas que en el PI se diferenciaban para activar el control o no. Esto tiene la ventaja de no usar un switch para diferenciar las zonas a controlar respecto a las zonas de control, y completa todo el rango de velocidades con un único esquema de control. El controlador difuso puede controlar en un rango de velocidades más amplias; el PI llegaba hasta 17.5m/s mientras que el difuso lo hacía hasta 20 m/s .

## 8. Agradecimientos

Gorka Zubeldia agradece a la fundación Novia Salcedo, del país Vasco, por el apoyo económico recibido y al INEEL de México por recibirlo en sus instalaciones.

Mónica Borunda agradece al CONACYT por su Cátedra de Investigación No. 71557, y al INEEL como institución receptora.

## 9. Referencias

- [1] Renewable Capacity Statistics 2019. The International Renewable Energy Agency
- [2] Global Energy % CO2 Status Report. The latest trend in energy and emissions in 2018. International Energy Agency (IEA)
- [3] Wei Tong, Kollmorgen Corporation, Virginia. Fundamentals of wind energy. WIT Trans. on State of Art in Science and Engineering, Vol 44.
- [4] Main component of a wind turbine. Tesla School of Electrical Engineering, Electronics Automation and Computer Technology.
- [5] Tumo-Int 1000W 3 Blades Small Wind Turbine. Tumo-Int Corporation Limitd.
- [6] Al-ahmed, Omer & Fawaz, S & , Abdullah & N Hamoodi, Ali. (2016). Modeling and analysis of 1kW Wind Turbine Generator Using Matlab Simulink. International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering. 5. 2319-7463.
- [7] Unai Esparza Baquer. Diseño y optimización de un sistema de generación aislada de energía eólica orientado a las necesidades de poblaciones sin acceso a la red eléctrica. Universidad Pública de Navarra. 2011.
- [8] Asghar, Aamer & Liu, Xiaodong. (2018). Online Estimation of Wind Turbine Tip Speed Ratio by Adaptive Neuro-Fuzzy Algorithm. International Journal of Advanced Computer Science and Applications.
- [9] Maximiliano Bueno López, Diego Felipe Barrero, Sandra Yomary. Sistema de Control para Aerogeneradores Empleando Lógica Difusa. Grupo de investigación AVARC.
- [10] Indira X. Alcaide Górdinez & Raúl Garduño Ramirez. Modelo y Control de la MEM en Matlab-Simulink. Desarrollo del sistema de control de la máquina eólica mexicana. 2012
- [11] J.F. Manwell, J.G Mcgowan, A.L. Rogers, Wind Energy Explained, Theory, design and application. 2009.
- [12] Thomas Ackermann. Wind Power in Power Systems. Royal Institute of Technology, Stockholm. 2005
- [13] Jianguang Qi, Yongxin Liu. PID control in adjustable-pitch wind turbine system based on Fuzzy control. 2010 2nd International Conference on Industrial Mechatronics and Automation.
- [14] Amendola, C.A.M & Gonzaga, D.P. Fuzzy-logic Control System of a Variable-Speed Variable-Pitch Wind-Turbine and a Double-Fed Induction Generator. Seventh International Conference on Intelligent Systems Design and Applications.
- [15] Samuel Diciembre Sanahuja. Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mandami y de Takagi-Sugeno-Kang. 2017

## 10. Biografías



**Gorka Zubeldia** obtuvo el grado de ingeniero en energías renovables y el de maestro en la integración de energías renovables a la red eléctrica, ambos por la Universidad del País Vasco en España. Sus actividades de investigación se han relacionado con el diseño y control optimizado de plantas de energía undimotriz de tecnología de columna de agua oscilante (OWC) y el control difuso de velocidad de turbinas eólicas de eje horizontal con ajuste de la posición angular de las palas.



**Raul Garduño** es doctor por la Pennsylvania State University en EEUU. Es investigador en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias en el área de sistemas de control para plantas eléctricas convencionales y renovables. Sus áreas de interés incluyen: control digital e inteligente de turbogeneradores, monitoreo y diagnóstico, optimización multiobjetivo de sistemas de conversión de energía. Es autor de "Fossil-Fuel Power Plant Control: An Intelligent Hybrid Approach".



**Mónica Borunda** obtuvo su doctorado en Física de Altas Energías en la International School for Advanced Studies en Italia. Obtuvo el título de física en la UNAM, México, obteniendo la medalla Gabino Barreda. Ha realizado estancias de investigación y postdoctorales en varios países de América, Europa, Asia y Oceanía. Pertenece al SNI nivel 1. Trabaja en aplicaciones de inteligencia artificial a la generación y uso de la energía y cuenta con varios artículos científicos en esta área.



**Miguel A. Hernández** es doctor en ingeniería eléctrica en el área de control automático. Cuenta con estudios profesionales en ingeniería en computación. Actualmente profesor-investigador de la Universidad del Istmo. Interesado en la investigación y desarrollo de esquemas de control inteligentes (software y hardware) aplicados a sistemas de generación de energía a partir del uso de fuentes renovables. De igual forma en el desarrollo de sistemas de simulación en realidad virtual.

# Simulación del viento en Realidad Virtual con Autómatas Celulares.

R. Pool-Canul<sup>1,a</sup>, A. Salcido<sup>2,b</sup>, G. Santamaría-Bonfil<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Quintana Roo, División de Ciencias e Ingenierías

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Programa de Sustentabilidad Ambiental

<sup>3</sup> CONACYT-INEEL, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, Gerencia de Tecnologías de la Información

<sup>a</sup> rogerrpcc@gmail.com, <sup>b</sup> salcido@ineel.mx, <sup>c</sup> guillermo.santamaria@ineel.mx

**Resumen**— Se presenta la simulación del comportamiento macroscópico del viento para aplicaciones de realidad virtual utilizando autómatas celulares, particularmente el modelo HPP, para optimizar el tiempo de cómputo. Se simula el comportamiento de una explosión de viento.

**Palabras clave.** Autómatas Celulares, Realidad Virtual, Simulación del Viento, Microrred.

## 1. Introducción

El desarrollo de ambientes virtuales diseñados para capacitar a trabajadores tiene una gran relevancia para el sector energético del país. El aprendizaje en estos ambientes ahorra tiempo y dinero, además de que es más seguro. Una microrred es un sistema de generación eléctrica bidireccional integrado con electrónica de potencia utilizado para distribuir electricidad favoreciendo la incorporación de energía renovable. Estos sistemas pueden estar interconectados a la red eléctrica tradicional o funcionar de forma aislada. Un ambiente virtual de una microrred debe tener un alto nivel de inmersión y representar adecuadamente todos los componentes que lo conforman. Al incorporar energía renovable como la eólica se debe considerar el viento como un elemento a modelar dentro del entorno. Si bien los motores de videojuegos como Unity permiten modelar la mayoría de los elementos de una microrred, la interacción de fenómenos físicos como movimiento de fluidos y sólidos son modelados mediante métodos numéricos tradicionales los cuales son altamente costosos computacionalmente. Esto reduce su aplicabilidad en sistemas de realidad virtual lo cual es esencial para que el modelo de un aerogenerador sea más exacto y en consecuencia lograr una mayor inmersión [1].

## 2. Parte técnica del artículo.

EL flujo de fluidos incomprensibles puede ser descrito por las ecuaciones de Navier – Stokes (1) en conjunto con la ecuación de continuidad (2):

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} = -\nabla P + \nu\nabla^2\mathbf{u} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

Donde  $\nabla$  es el operador nabla,  $\mathbf{u}$  la velocidad del flujo,  $P = p/\rho_0$  la presión cinemática,  $p$  la presión,  $\rho_0$  la densidad y  $\nu$  la viscosidad cinemática. La ecuación (1) no es lineal por lo que para ser utilizada para simulación en el tiempo  $t$ , se deben de utilizar métodos numéricos los cuales son altamente costosos computacionalmente.

Los autómatas celulares son arreglos de celdas de sistemas dinámicos que evoluciona en tiempos discretos al igual que el estado de los mismos autómatas. A pesar de que evoluciona a partir de reglas simples de actualización de estado, pueden mostrar un comportamiento complejo conforme el tiempo aumenta por lo que los hace adecuados para modelar fenómenos físicos como, por ejemplo, flujo de fluidos. Los gases en red (*Lattice-gas cellular automata*, LGCA) son autómatas celulares utilizados especialmente para simular el flujo de fluidos [2]. En este tipo de autómatas la actualización sucede en dos partes llamadas colisión y propagación. La colisión sucede en la actualización de estado que asigna valores a cada celda. Después de la colisión las celdas son propagadas a otra adyacente según el estado asignado. El modelo HPP (llamado así en honor a sus creadores de apellidos Hardy, de Pazzis y Pomeau, en 1973) es el primer LGCA desarrollado.

La evolución en el tiempo en este modelo es determinista y sigue un orden de alternancia entre colisiones  $C$  y propagaciones  $P$ . Las colisiones se dan únicamente cuando dos partículas entran a una celda en direcciones opuestas las cuales rotan las partículas  $90^\circ$  en el mismo sentido. Las propagaciones las realizan todas las partículas dependiendo del estado que tengan, los cuales se muestran en la Fig. 1.

0		4	←	8	↓	12	↙
1	→	5	←→	9	↘	13	↕
2	↑	6	↙	10	↕	14	↕
3	↙	7	←→	11	↕	15	↕

Figura 1. Estados HPP.

Para implementar el modelo HPP en Unity se sigue el algoritmo mostrado en la Fig. 2. La programación se realiza con el lenguaje C#.

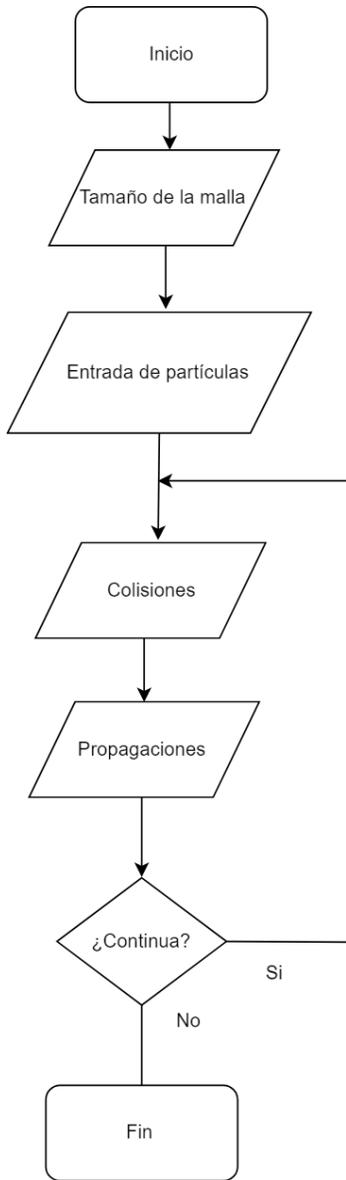


Figura 2. Algoritmo general HPP.

Se define una matriz bidimensional de  $n \times m$ , llamada *matrix*. La notación de los elementos corresponde a la sintaxis de C#. Posteriormente, inicializaremos las partículas. Esta inicialización puede ser aleatoria o determinista. Después se revisa cada elemento de la matriz y en los casos donde exista una colisión, es decir, los estados 5 y 10, según el modelo HPP, se intercambian los estados 5 y 10 mediante una instrucción if. Por ejemplo, si en el elemento  $matrix[40, 34] == 5$  (es igual a 5) entonces,  $matrix[40, 34] = 10$  y viceversa.

Para las propagaciones, se evalúa para cada celda de la matriz los estados en las direcciones norte, sur, este y oeste, de tal modo, que para el elemento  $matrix[i, j]$  se evalúa  $matrix[i, j - 1]$ ,  $matrix[i, j + 1]$ ,  $matrix[i + 1, j]$  y  $matrix[i - 1, j]$ , como se muestra en la Fig. 3. La propagación a la celda en cuestión la realizan los estados que “apuntan” hacia la celda misma.

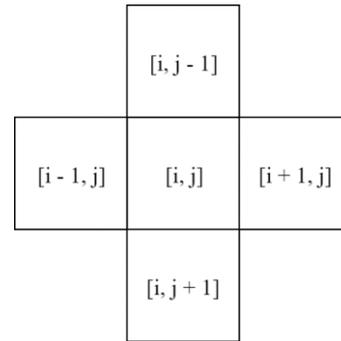


Figura 3. Celdas adyacentes a  $matrix[i, j]$ .

Al finalizar la propagación de la última celda se ha avanzado un tiempo discreto,  $t$ . Para seguir avanzando en el tiempo deben realizarse de nuevo las colisiones y las propagaciones sucesivamente. En la Fig. 3 se muestra el resultado de implementar una implosión para el tiempo  $t = 0, 30, 60, 90, 120$  y  $150$  en una matriz de  $100 \times 100$ . Como experimento se estableció que las partículas reboten en sentido contrario al que llegan a los bordes.

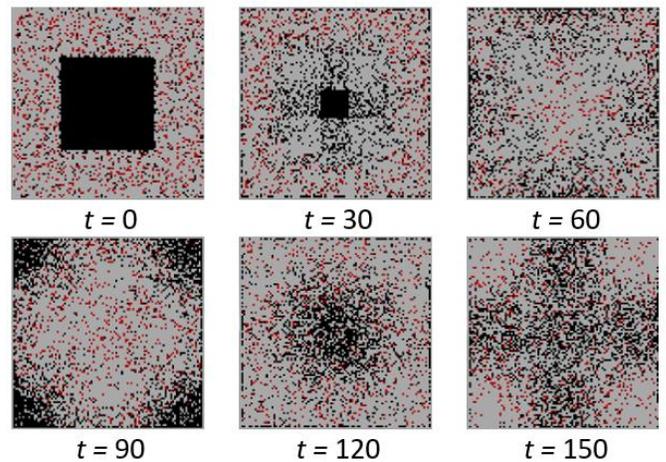


Figura 3. Evolución del modelo HPP para una implosión.

### 3. Conclusiones

Los resultados presentados muestran la simulación de fluidos en un ambiente diseñado para realidad virtual. En una primera etapa inicial se ha logrado visualizar correctamente el comportamiento esperado para una colisión de aire, por lo que deberán ser examinados otros fenómenos como explosión o flujo forzado hacia una determinada dirección. La integración

hacia sistemas más complejos como, por ejemplo, un ambiente virtual de una microrred debe ser completado en el futuro.

#### 4. Referencias

- [1] Timothy C. Clapper “Multidisciplinary Enjoyment and Learning in Simulation & Gaming”. *Simulation & Gaming* vol. 47(4), pp. 399-402, 2016.
- [2] Dieter A. Wolf-Gladrow, *Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models – An Introduction*, Springer, 2005.

#### 5. Biografías

*Roger Enrique Pool Canul. Egresado de la carrera de Ingeniería en Sistemas de Energía de la Universidad de Quintana Roo participó en Exposiciones Nacionales 2016 llevado a cabo en la ciudad de Villahermosa y en un intercambio académico internacional en la Universidad de Santiago de Chile. También realizó una estancia de investigación científica de verano en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, donde trabajó en un proyecto de Realidad Virtual para la educación.*

*El Dr. Alejandro Salcido actualmente trabaja en el Programa de Sustentabilidad Ambiental, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (Cuernavaca, México). Alejandro realiza investigación en Matemáticas Aplicadas, Termodinámica y Dinámica de Fluidos. Su proyecto actual se titula 'Cellular Automata Models for Fluids, Traffic Flow and other Physical Systems.'*

*Guillermo Santamaría Bonfil, es doctor en ciencias computacionales por el ITESM campus Cuernavaca con la tesis una metodología basada en SVR para el pronóstico de la volatilidad en Índices Financieros. Se ha especializado en el desarrollo de algoritmos para el pronóstico de series de tiempo empleando técnicas de aprendizaje de máquina e inteligencia artificial. Estos métodos han logrado mejoras en precisión/varianza y generalización en fenómenos como la velocidad de viento, o la varianza en índices bursátiles. Además, realizó una estancia de investigación en el INEEL, y un posdoctorado en el IIMAS. Sus contribuciones han sido publicadas en revistas del JCR y revistas internacionales arbitradas. Ha participado en congresos como conferencista magistral y seminarios de distintos institutos. Fungió como científico de datos en Bancomer BBVA donde aplicó sus conocimientos en aprendizaje automático para el manejo del riesgo en operaciones crediticias y préstamos. Actualmente es investigador en aprendizaje automático, realidad virtual y sus aplicaciones a sistemas de energía.*

# A Convex Formulation for Optimal Power Factor Correction in Power Electronic Converters for Photovoltaic Applications

Alexander Casilimas Peña and Alejandro Garcés  
Department of Electric Power Engineering  
Universidad Tecnológica de Pereira (UTP)  
AA: 97 - Post code: 660003  
Email: {acasilimas,alejandro.garces}@utp.edu.co

Oscar Danilo Montoya  
Program of Electrical and Electronic Engineering  
Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB)  
Post code: 131001, Cartagena, Colombia  
E-mail: o.d.montoyagiraldo@ieee.org

**Abstract**—This paper presents a method for the optimal power factor calculation in power electronic converters for photovoltaic (PV) systems. Both three-phase and single-phase converters are considered through an unbalanced modeling of the grid. A Wirtinger’s linearization is used for the power flow equations in order to obtain an affine set of constraint and make the problem convex. Stochastic behaviour of the solar radiation is considered by a sample average approximation which maintains the problem convex and computationally tractable. Numerical results performed in CVX/MATLAB on the CIGRE benchmark microgrid with real data of solar radiation, complement the analysis and demonstrate the applicability of the method.

**Index Terms**—convex optimization, microgrids, stochastic convex optimization, reactive power management, power factor.

## I. INTRODUCTION

Modern distribution systems are characterized by a high penetration of renewable energies such as wind and photovoltaics, which are integrated through power electronic converters [1]. Although these converters have some power factor compensation capability, they are usually operated at unit power factor; this operation mode reduces the efficiency of the entire system [2]. One of the most promising ways to solve this problem is by including communications and a power factor management system. However, this approach is still expensive in many practical applications. Therefore, an optimization model for the power factor is required in order to define a fixed set point taking into account the stochastic behaviour of the solar generation.

This paper presents a methodology for the defining this fixed set point, based on a series of convex approximations. A three-phase modelling of the grid is proposed considering single and three-phase converters. Physical limitations of the converters are also considered and the grid equations are linearized by using Wirtinger’s calculus. The stochastic behaviour of the solar radiation is considered by the sample average approximation in order to maintain the problem convex and computationally tractable. Real data for solar radiation are considered an applied to the CIGRE benchmark [3].

This work was partially supported by the program in Master on Electrical Engineering at Universidad Tecnológica de Pereira.

Several methods were proposed before to solve this problem. In [4], a decentralized self-adjusting reactive power controller was proposed, where the objective was to compensate the reactive power of local loads and share reactive power of non-local loads. That control included a drop constant that was adjusted according their reactive power. In [5], it was analyzed the system using a generalized dc power flow and quadratic programming obtaining an optimal reactive power flow that was used to control the reactive power supplied by each distributed generator. Reference [6], proposed a wireless control strategy using optimized virtual impedance controllers and load measurements of reactive power sharing through the network, a genetic algorithm was used to define the virtual impedance parameters of each distributed generator which reduce the global reactive power sharing error. In [7], the authors presented the concept of stochastic game modelling from game theory to develop an algorithm to solve a multi-objective optimization, which included the reactive power reserve maximization and the improvement of voltage profile. Reference [8], presented a control strategy for islanded microgrids, using small signal models, state estimator, optimal regulator and an optimal control; all these allowed voltage regulation without communication systems. Authors in [9] presented a review of multiple sharing strategies of active and reactive power in hierarchical controlled microgrids. [10] mentioned multiple reactive power control strategies considering the smart grids paradigm. The management of distributed energy resources and the distributed network aggregator, namely Virtual Power Plant, was proposed and implemented in a simulation tool. In [11] it was proposed a bibliographical revision of mathematical methods used for optimal selection and location of reactive power compensating elements applied on distribution systems most of them based on metaheuristics. There are a few articles that study the stochasticity of the renewable resources and load on microgrids, some like [12], realize their investigation doing a mathematical analysis of all the components and stochastic behavior of the system to obtain an optimal power flow and reduce losses.

The main differences between the aforementioned ap-

proaches and the one presented here are the following: i) the proposed model is convexified by using a Wirtinger's linearization on the power flow equations [13]. This linearization allows to guarantee global optimal in the approximated model with high accuracy and fast convergence of the interior point algorithms. ii) The proposed model consider directly the stochastic behaviour of the solar generation by using a sample average approximation. This approximation takes into account the stochastic nature of the sun radiation and the loads, without jeopardize the convergence and uniqueness properties of the convex model. iii) The implementation of the proposed methodology can be executed directly in commercial converters, since it does not require communications or real time operation. The main idea of this, is to schedule the power factor of the converter for each type of day and each hour without a master controller.

The rest of the article is organized as follows: Section II presents the problem statement where the objective function and the constraints are presented considering the conventional non-linear non-convex representation of the grid. Section III presents the convex formulation and explains the relaxation of the power flow using Wirtinger's linearization. The stochastic model is explained in Section IV. Finally, simulation results on the CIGRE model are presented in Section V followed by conclusions and relevant references.

## II. PROBLEM STATEMENT

### A. Nomenclature

$p_L$	Total power losses.
$\mathbb{E}(x)$	Expected value of the random variable $x$ .
$p_{kG}$	Active power, generated at the converter connected at node $k$ .
$q_{kG}$	Reactive power generated at the converter connected at node $k$ .
$v_k$	Voltage value in the node $k$ .
$y_{km}$	Component $km$ of the nodal admittance matrix.
$s_{k(max)}$	Maximum capability of the converter connected to the node $k$ .
$p_{kG(max)}$	Maximum generated power in the converter connected to the node $k$ .
$v_{min}, v_{max}$	Minimum and maximum voltages allowed in the grid.
$\xi_t$	scenario of irradiance.
$\rho_t$	probability of the scenario $\xi_t$

### B. Model definition

Let us consider a microgrid represented by the three-phase nodal admittance matrix  $Y$ , which is splitted in two sub-matrices, namely  $Y_S$  for the substation and  $Y_N$  for the rest of the nodes. A three-phase representation of the grid is considered, thus, the slack node has three components as given in (1):

$$V_S = \begin{pmatrix} V_{A(slack)} \\ V_{B(slack)} \\ V_{C(slack)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

The grid is therefore represented by the following non-linear / non-affine model:

$$\left( \frac{s_k}{v_k} \right)^* = \sum_m y_{km} v_m \quad (2)$$

where  $*$  represents the complex conjugate operator and  $v_k, v_m \in V_N, y_{km} \in Y_N$ . The optimization model consists on minimizing the expected value of total losses  $p_L$  subject to technical constrains as follows:

**Model 1.** Complete model for the optimal set point of the reactive power in a three-phase grid

$$\min \mathbb{E}(p_L, \xi_t) \quad (3)$$

$$(p_{kG} - p_{kD}) - j(q_{kG} - q_{kD}) = \sum_m v_k^* y_{km} v_m \quad (4)$$

$$v_{min} \leq \|v_k\| \leq v_{max} \quad (5)$$

$$\sqrt{p_{kG}^2 + q_{kG}^2} \leq s_{k(max)} \quad (6)$$

$$p_{kG} \leq p_{kG(max)}(\xi_t) \quad (7)$$

where (3), is a convex function that represents the expected losses of the network, (4) are non-linear and non-convex equations that represent the active and reactive power flow constraints respectively, (5) is the maximum and minimum voltage of the grid, (6) is the capability of the converter and (7) is the maximum power that can be generated in each node. Notice that (6) depends on the converter whereas (7) depends on the primary resource (i.e the scenario of the irradiance  $\xi_t$ ). Therefore,  $p_{kG(max)}$  is a random variable. It is important to note that (4) is maintained in complex form for the sake of a simple representation. However, this equation requires to be separated into real and imaginary parts.

This problem is difficult to solve due to the non-linear non-convex nature of the power flow equations but also due to the stochastic nature of the model. In the next section, the model is simplified for a deterministic case in order to obtain a convex model (see [14] for a formal definition of convexity). After that, in Section IV the stochastic model is considered.

## III. CONVEX FORMULATION

The problem of non-convexity and non-linearity mentioned in Section II has to be relaxed in order to obtain a tractable model. There are different linearizations proposed in the literature standing out the one presented by Bolognani [15], Marti [16] and Garcés [17]. Although each of these linearizations comes from a different theoretical background<sup>1</sup>, they are equivalent for values close to 1 p.u. In this paper, use a linearization based on Wirtinger's calculus. Like the previous linearization, this is equivalent for values close to 1 p.u. However, the advantage of this approach is that it guarantees an affine separation between voltages and powers in the optimization model. The distributed resources are considered

<sup>1</sup>The first approximation is an application of the Banach fixed point theorem, the second is a curve-fitting and the third is a Taylor expansion

by using a ZIP model. A deep mathematical analysis of this linearization is beyond the objectives of this paper, but can be found in [13]. The approximated representation of a three phase grid-connected is given by:

$$S^* = H \cdot V_N^* + M \cdot V_N + T \quad (8)$$

where  $H, M, T$  are constant matrices defined by:

$$H = \text{diag}(Y_{Sk} \cdot V_S) + \text{diag}(Y_N \cdot V_{N0}) \quad (9)$$

$$M = \text{diag}(V_{N0}^*) \cdot Y_N \quad (10)$$

$$T = -\text{diag}(V_{N0}) \cdot (Y_N \cdot V_{N0}^*) \quad (11)$$

Therefore, Constraint (4) can be represented as follows:

$$(p_{kG} - p_{kD}) + j(q_{kG} - q_{kD}) = T_k + \sum_{m=1}^N H_{km} v_m^* + M_{km} v_m \quad (12)$$

Notice that (12) define an affine space even when it is separated into real and imaginary parts, since neither  $H, M$  or  $T$  depends of the power as is the case of [17].

#### IV. STOCHASTIC MODEL

The proposed model is designed for microgrids and small power distribution systems. Therefore, the irradiance scenario is the same for all the panels in the grid. The proposed methodology takes real data for generated power and define  $n_t$  scenarios with probability  $\xi_t$ . In this situation, the expected value of the losses can be represented by the following sample average approximation which define an affine equation:

$$\mathbb{E}(p_L, \xi_t) = \sum_t^{n_t} \xi_t p_{Lt} \quad (13)$$

where  $\xi_t$  is the probability of each scenario. The number of scenarios can grow very fast in many power systems applications. However, the main supposition of this work is that the solar panels are very close geographically and hence, the scenario is the same in all the panels along the microgrid. In this situation, the value of  $n_t$  is small as will be presented in the results. Collecting all the aforementioned approximations, the model takes the following structure

**Model 2.** *Approximated convex model for the optimal power factor in a three-phase grid*

$$\min \sum_t \xi_t^{n_t} p_{Lt} \quad (14)$$

$$(p_{kG} - p_{kD}) + j(q_{kG} - q_{kD}) = T_k + \sum_{m=1}^N H_{km} v_m^* + M_{km} v_m \quad (15)$$

$$v_{min} \leq \|v_k\| \leq v_{max} \quad (16)$$

$$\sqrt{p_{kG}^2 + q_{kG}^2} \leq s_{k(max)} \quad (17)$$

$$p_{kG} \leq p_{kG(max)}(\xi_t) \quad (18)$$

Note this model is convex and tractable if the number of scenarios is finite. The power factor can be calculated after

the optimization model is solved, by using the values of  $p$  and  $q$ . In the next section, the generation of these scenarios will be presented.

#### V. RESULTS

The proposed model was evaluated on the CIGRE benchmark [3] shown in Fig 1. The stochastic phenomenon was modeled as a set of scenarios using a database of irradiance with 8605 values taken in September of 2012 at Universidad Tecnológica de Pereira.

Using this database, five cases with different scenarios of solar radiation were generated, for three specific hours at the day, one at sunrise it means at 6:00 a.m, the second one at mid-morning, which is at 9:00 a.m and the last one at maximum solar radiation point which is at 12:00 p.m. Fig. 2 show the number of scenarios and the respective frequency (which can be transformed into probability).

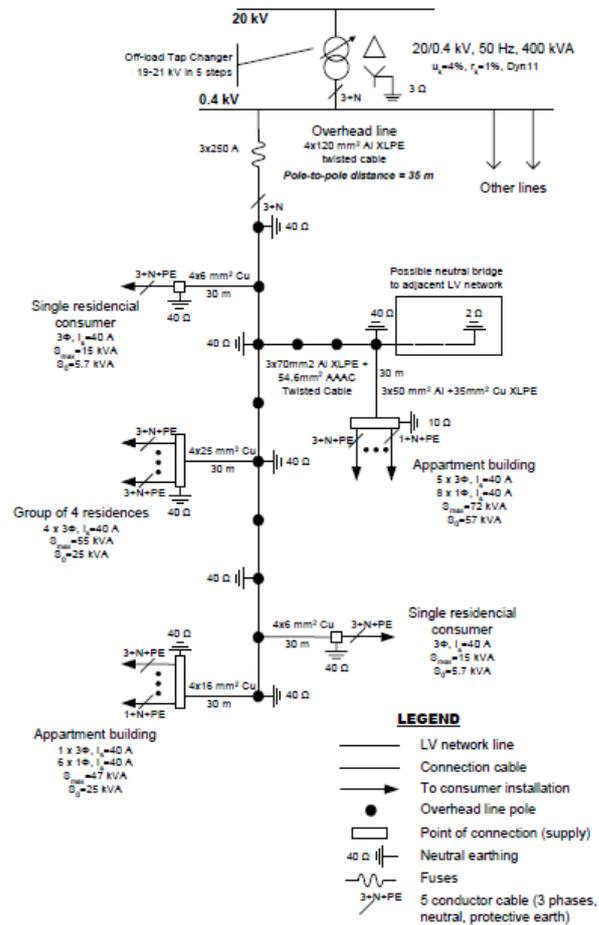


Fig. 1. Unifilar Diagram of the CIGRE Benchmark, Image taken from [3]

As we can see on Fig. 2, the radiation level is different every case, with that in mind the generation of the system is going to change on any case allowing us to obtain different profiles of power factor for each scenario. Equation (14) presents to us a minimization of the losses, optimizing the active and reactive

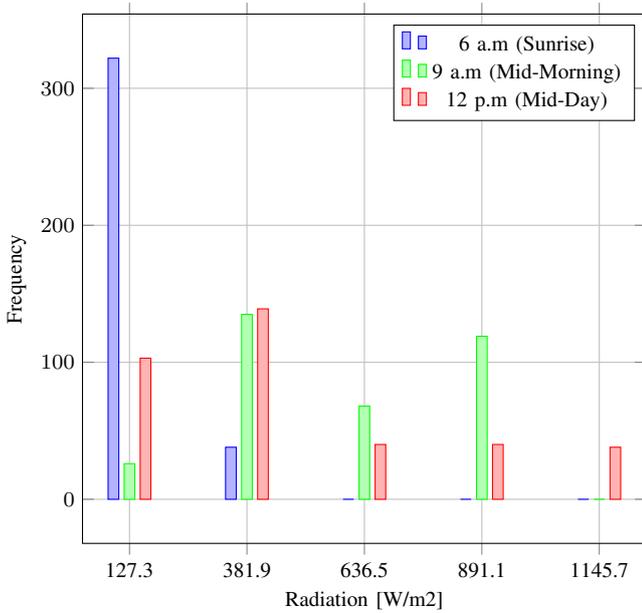


Fig. 2. Solar scenarios at three specific hours of the day

power supplied by each solar power plant connected to the microgrid. Starting from the basic definition of power factor:

$$\varphi_k = p_k / s_k \quad (19)$$

In this equation, the element  $s_k$ , represent the magnitude of apparent power. By doing some algebraic operations, we obtain a representation of reactive power in function of the active power and the power factor:

$$q_k = p_k \sqrt{(1/\varphi_k^2) - 1} \quad (20)$$

It is defined a element that was explained on (7), this element  $\phi$  limits the amount of reactive power on the grid, which is obtained as a result of the CVX model programmed on MATLAB. With this we can obtain the power factor for each optimized solar source.

$$\rho_k = \sqrt{(1/\varphi_k^2) - 1} \quad (21)$$

Our test system is based on Cigre Microgrid [3] using the same conductors type and scheme of the grid but with some modifications. This microgrid have three mono-phase generators connected to each phase of the node 2 and three, three-phase solar generators connected to nodes 7, 13 and 18 with six unbalanced loads located at nodes at nodes 3, 8, 11, 14 and 15. The model was solved in CVX-MATLAB and executed in a computer with the next settings (Intel i7 processor with 6 GB of RAM).

#### A. Case 1 - 6 a.m

This case was evaluated at 6:00 a.m with a computational time of 11.0507 seconds, at this, the radiation level is low and as was shown in Fig. 2, the amount of data can only represent two of five scenarios. Figs. 3 and 4 present an optimal power factor by scenario as an outcome of the optimization problem. Table I provides us the expected value for each generator, as can be seen, most of the generator nodes where set with a power factor of 1 except node 13 which power factor is lower than one.

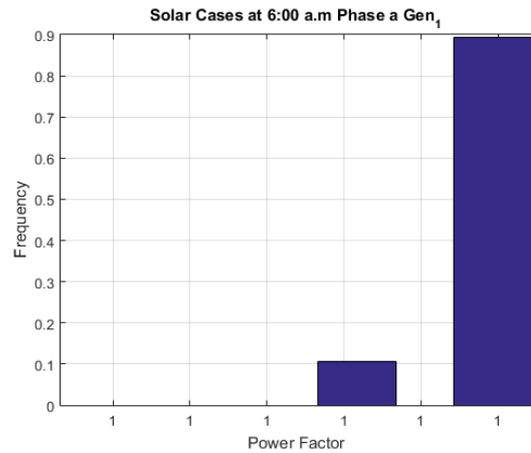


Fig. 3. Possible power factor levels for phase a Gen 1 node 2

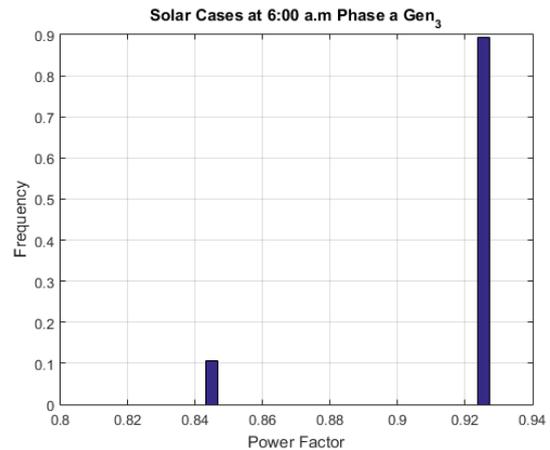


Fig. 4. Possible power factor levels for phase a Gen 3 node 13

TABLE I  
EXPECTED REACTIVE POWER FOR CASE 1

Generator	Node	Phase	$E_{\varphi}$
1 <sub>1φ</sub>	2	A	1.0000
2 <sub>1φ</sub>	2	B	1.0000
3 <sub>1φ</sub>	2	C	1.0000
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	1.0000
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	1.0000
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	1.0000
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.9169
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.9169
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.9169
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000

B. Case 2 - 9 a.m

The second test was evaluated at 9:00 a.m or mid-morning with a computational time of 12.13337 seconds, the radiation level at this hour present higher values than Case 1, on Fig. 2, the amount of compiled solar data represent four of the five proposed scenarios. Figs. 5 and 6 present the optimal power factor by scenario as result of the optimization problem. Table II provide us the expected value of power factor for each generator, it can be observed that in this case two sources start to inject power factor to grid located at nodes 7 and 13, the rest of the generation nodes keep their power factor unitary.

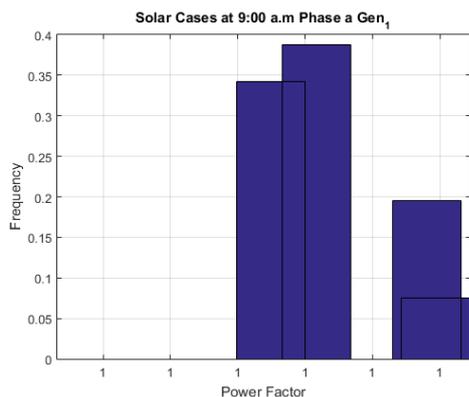


Fig. 5. Possible power factor levels for phase a Gen 1 node 2

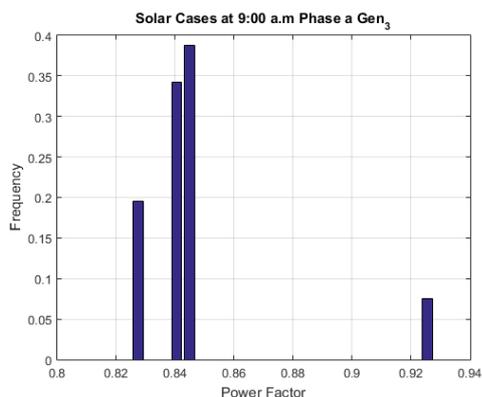


Fig. 6. Possible power factor levels for phase a Gen 3m node 13

TABLE II  
EXPECTED REACTIVE POWER FOR CASE 2

Generator	Node	Phase	$E_{\varphi}$
1 <sub>1φ</sub>	2	A	1.0000
2 <sub>1φ</sub>	2	B	1.0000
3 <sub>1φ</sub>	2	C	1.0000
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9960
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9960
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9960
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8460
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8460
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8460
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000

C. Case 3 - 12 p.m

This case was evaluated at 12:00 p.m with a computational time of 11.5454 seconds, at this time, the peak level of maximum solar radiation is found, higher than cases 1 and 2. Fig. 2, show that the solar information was enough to fit all the five proposed scenarios. Figures 7 and 8 present the optimal power factor by scenario for each generator as an outcome of the optimization problem. Table III display the result of the expected power factor, sources connected to nodes 7 and 13 reduce their power factor. As on case 2 the same sources reduce their power factor, that is because the bigger loads are connected near to those generation nodes.

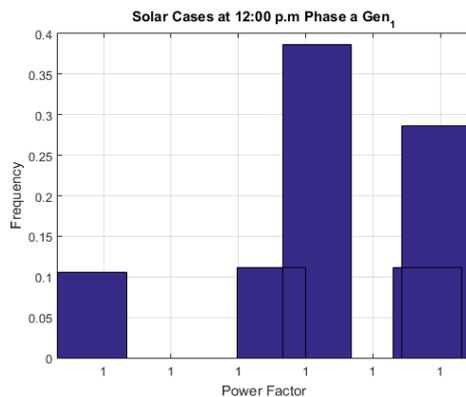


Fig. 7. Possible power factor levels for phase a Gen 1 node 2

TABLE III  
EXPECTED REACTIVE POWER FOR CASE 3

Generator	Node	Phase	$E_{\varphi}$
1 <sub>1φ</sub>	2	A	1.0000
2 <sub>1φ</sub>	2	B	1.0000
3 <sub>1φ</sub>	2	C	1.0000
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9951
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9951
1 <sub>3φ</sub>	7	ABC	0.9951
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8662
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8662
2 <sub>3φ</sub>	13	ABC	0.8662
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000
3 <sub>3φ</sub>	18	ABC	1.0000

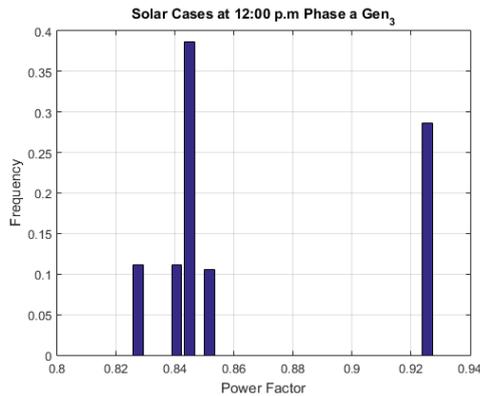


Fig. 8. Possible power factor levels for phase a Gen 3 node 13

## VI. CONCLUSIONS

The development of an alternative methodology for reactive power management on microgrids was presented. Our methodology, allows through the use linearized models, stochastic process and convex optimization, can be use the capability that converters have to program in them multiple power factor behaviors so that they can consume or inject reactive power of the grid.

Based on the obtained results from our simulations and test on each cases from low to high levels of radiation, even though the main idea on power systems is to have a unitary power factor, was found that on small microgrids with high inclusion of photovoltaic generation as the radiation level rises through the time, the generators tend to decrease their power factor injecting reactive power to the grid both to reduce losses and improve the voltage profiles of the grid and with it, replace the function of capacitor banks or other reactive compensation devices. Beside this, our methodology allow us to set effectively the behavior of the sources all day, all year without the need of a master controller that could increase the cost of the microgrid, making viable the use of these technologies on a small scale.

## REFERENCES

- [1] M. Rabiul Islam, A. M. Mahfuz-Ur-Rahman, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "State-of-the-art of the medium-voltage power converter technologies for grid integration of solar photovoltaic power plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 372–384, March 2019.
- [2] W. Lu, S. Lang, L. Zhou, H. H. Iu, and T. Fernando, "Improvement of stability and power factor in pcm controlled boost pfc converter with hybrid dynamic compensation," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 62, no. 1, pp. 320–328, Jan 2015.
- [3] S. Papathanassiou, N. Hatzigiorgianni, and K. Strunz, "A benchmark low voltage microgrid network," *CIGRE Symposium*, 01 2005.
- [4] M. Hamzeh, H. Mokhtari, and H. Karimi, "A decentralized self-adjusting control strategy for reactive power management in an islanded multi-bus mv microgrid," *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 18–25, Winter 2013.
- [5] S. Bolognani and S. Zampieri, "A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 11, pp. 2818–2833, Nov 2013.

- [6] Y. Zhu, F. Zhuo, F. Wang, B. Liu, R. Gou, and Y. Zhao, "A virtual impedance optimization method for reactive power sharing in networked microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 4, pp. 2890–2904, April 2016.
- [7] M. A. Arif, M. Ndoye, G. V. Murphy, and K. Aganah, "A stochastic game framework for reactive power reserve optimization and voltage profile improvement," in *2017 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP)*, Sep. 2017, pp. 1–6.
- [8] Y. Wang, X. Wang, Z. Chen, and F. Blaabjerg, "Distributed optimal control of reactive power and voltage in islanded microgrids," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 1, pp. 340–349, Jan 2017.
- [9] Y. Han, H. Li, P. Shen, E. A. A. Coelho, and J. M. Guerrero, "Review of active and reactive power sharing strategies in hierarchical controlled microgrids," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 2427–2451, March 2017.
- [10] H. Morais, T. Sousa, P. Faria, and Z. Vale, "Reactive power management strategies in future smart grids," in *2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*, July 2013, pp. 1–5.
- [11] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. González, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. review," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746, 2018. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018332766>
- [12] V. Kekatos, G. Wang, A. J. Conejo, and G. B. Giannakis, "Stochastic reactive power management in microgrids with renewables," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, no. 6, pp. 3386–3395, Nov 2015.
- [13] D.A.Ramirez, A.Garces, and J.J.Mora, "A wirtinger linearization for the power flow in microgrids," *IEEE General Meeting* 2019.
- [14] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, 2004.
- [15] S. Bolognani and S. Zampieri, "On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 163–172, Jan 2016.
- [16] J. R. Martí, H. Ahmadi, and L. Bashualdo, "Linear power-flow formulation based on a voltage-dependent load model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 3, pp. 1682–1690, July 2013.
- [17] A. Garces, "A linear three-phase load flow for power distribution systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 827–828, Jan 2016.

**Alexander Casilimas** received the Bachelor degree in electrical engineering from Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia, in 2016. He is currently master student at UTP. His research interest include renewable energies, power electronics, power quality and mathematical optimization.

**Alejandro Garcés** (M'04, SM'15) Received the Bachelor and Master degree in electrical engineering from the Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia in 2006, and the Ph.D. degree from the Norges Teknisk Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), Norway, in 2012. He is currently Professor in the Department of Electric Power Systems at UTP. His research interests include renewable energies, mathematical optimization, power system dynamics and HVDC transmission.

**Oscar Danilo Monotoya** Received his B.Sc., M.Sc., and Ph.D degrees in Electrical Engineering from Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, in 2012, 2014 and 2019, respectively. He is currently working as an assistant professor at the Electrical Engineering program at Universidad Tecnológica de Bolívar. His research interests include mathematical optimization, planning and control of power systems, renewable energy, energy storage, protective devices, passivity-based control, and dynamical analysis.

# Aplicación de Técnicas Computacionales para el Estudio del Flujo de Energía en Forma de Calor en Habitaciones

R. E. Lilly-Velázquez<sup>1,a</sup>, G. E. Ovando-Chacon<sup>1,b</sup>, S. L. Ovando-Chacon<sup>2,c</sup>, J. C. Prince-Avelino<sup>1,d</sup>, A. Rodriguez-León<sup>1,e</sup>,

<sup>1</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Veracruz

<sup>2</sup> Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

<sup>a</sup> rogeliolilly@gmail.com, <sup>b</sup> ovachag@hotmail.com, <sup>c</sup> ovansandy@hotmail.com, <sup>d</sup> jcpa@itver.edu.mx, <sup>e</sup> arleon@itver.edu.mx

**Resumen**—Debido a la geografía de la región sureste de nuestro país y a las altas temperaturas en estas zonas es de gran relevancia encontrar técnicas de climatización pasivas para un uso eficiente de la energía en habitaciones. En este trabajo se presenta un estudio de simulación numérica mediante técnicas de dinámica de fluidos computacionales usando el método de elemento finito, para caracterizar el comportamiento térmico de una habitación con medidas y valores reales de las propiedades de los materiales. Como resultados se obtienen los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura y los valores de los coeficientes de transferencia de calor. El análisis se realizó para diferentes horas del día y diferentes aperturas de una ventana.

*Palabras clave.* Transferencia de calor, climatización pasiva, análisis térmico, ventilación.

## 1. Introducción

La republica Mexicana se encuentra localizada en una región favorecida en recursos solares, es decir recibe diariamente una alta radiación solar durante gran parte del año. Lo anterior resulta ser una ventaja para producir energía a través de paneles solares o aprovechar el calor mediante calentadores solares. Sin embargo, al mismo tiempo representa una desventaja y un reto al momento de diseñar y construir edificaciones. La alta incidencia de radiación solar combinada con los altos porcentajes de humedad en zonas costeras del sur de México hacen necesario poner especial atención al momento de proyectar viviendas para asegurar tanto el confort como el ahorro energético, evitando ganancias de calor durante el verano.

A pesar de que en México el grueso de la población en la zona sur del país es pobre y sufre de las altas temperaturas durante gran parte del año, poco o nada se ha hecho para estudiar el comportamiento térmico en el interior de las viviendas que procuren mejorar las condiciones climáticas en la que viven sus habitantes. Algunos trabajos relacionados con el desempeño térmico en edificaciones desde el punto de vista computacional se han hecho pero para el centro del país donde las temperaturas no son tan altas. Gijón-Rivera et al. [1] simularon el comportamiento térmico de una oficina localizada en la planta alta de un edificio de la ciudad de México con tres diferentes configuraciones de ventanas. El análisis lo realizaron acoplado los enfoques de dinámica de fluido computacionales y el de simulación energética en edificios. La oficina se modeló mediante dinámica de fluidos computacionales como una cavidad cuadrada cerrada

bidimensional, obteniéndose los coeficientes de transferencia de calor que posteriormente fueron implementados en otro software para resolver el modelo de simulación energética en edificios. El edificio con vidrio reflejante fue la que presentó el menor consumo de energía. Xamán et al. [2] evaluaron computacionalmente el efecto conductivo del techo de una cavidad bidimensional cuadrada representada por una pared opaca horizontal con y sin recubrimiento con diferentes espesores y materiales. El resto de la cavidad estaba formada por un piso horizontal aislado, una pared lateral semitransparente de vidrio y una pared lateral opuesta isotérmica a 21 °C. En el techo opaco se consideró que parte de la radiación solar es absorbida y reflejada por el recubrimiento mientras el techo intercambia calor por convección y radiación con el ambiente. En la pared semitransparente de vidrio se consideró que parte de la radiación solar se refleja, se transmite y se absorbe por la pared. En el techo no se consideró transmisión de calor por radiación. El menor flujo de calor hacia el interior de la cavidad se alcanzó con un recubrimiento blanco aplicado sobre un techo compuesto de concreto y poliestireno expandido de 20 cm de espesor. Serrano-Arellano et al. [3] presentaron un análisis numérico del comportamiento térmico de un invernadero localizado en el estado de Querétaro. El invernadero se simplificó con una geometría bidimensional de una cavidad ventilada con una entrada de aire en la parte superior de la pared vertical izquierda y una salida de aire centrada en la pared vertical derecha. La simulaciones se realizaron para números de Reynolds de  $0 - 4 \times 10^4$  y diferentes valores de temperatura y configuraciones de la pared caliente. Bajo condiciones de un día típico las temperaturas óptimas en el interior del invernadero se alcanzaron para  $1 \times 10^4 < Re < 4 \times 10^4$ . Bajo condiciones de un día extremadamente caliente los estudios indican que el aire debe enfriarse antes de introducirse al invernadero ya que en tales condiciones el flujo de aire distribuiría altas temperaturas en su interior. Noh-Pat et al. [4] analizaron la influencia de la irradiación solar y la temperatura real del aire exterior de una localidad del estado de Morelos en la transferencia de calor conjugada de una cavidad cuadrada bidimensional con una pared de vidrio semitransparente con y sin cubierta de control solar. La pared semitransparente reflejaba parte de la energía incidente sobre su superficie, otra parte era absorbida por el medio

transparente y el resto de la energía se transmitía hacia el interior de la cavidad. La energía absorbida por la pared incrementó su energía interna, así como la temperatura superficial interior. Este incremento de temperatura junto con la energía transmitida a través del vidrio produjo un gran intercambio radiante interno entre las superficies. La cavidad con cubierta de control solar tuvo un menor periodo de tiempo con un flujo multicelular que la cavidad sin la cubierta de control. Rodríguez et al. [5] estudiaron la interacción entre los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación y la distribución de CO<sub>2</sub> en una cavidad bidimensional ventilada con fuente de calor. Los resultados se obtuvieron para dos diferentes velocidades de entrada de aire 0.05 y 0.5 m/s, así como diferentes posiciones de las entradas y salidas de aire. La ventilación natural redujo la temperatura promedio en la cavidad entre 4 °C y 5.5 °C, mientras la radiación incremento la temperatura promedio entre 0.2 °C y 0.4 °C. Además de técnicas computacionales diversas estrategias se han empleado para intentar reducir las cargas térmicas en el interior de habitaciones. Borbón et al. [6] analizaron la transferencia de calor en muros de bloques con cavidades huecas mediante un modelo en estado estacionario unidimensional que consideraba conducción, convección y radiación. En el interior se fijo una temperatura de confort de 25 °. Para la solución del modelo se considero una red de resistencias térmicas equivalentes en serie y paralelo considerando resistencias conductivas, radiativas y convectivas. Los resultados indicaron que la radiación contribuye un 56% del calor total transferido, la radiación un 25% y la conducción un 19 %. Lucero [7] realizó un estudio comparativo de recubrimientos para techos mediante simulaciones térmicas. Para ciudades con clima cálido extremo la reflectancia solar y la emisividad del techo mostraron un bajo efecto sobre el confort térmico, ya que la reducción de la temperatura del aire interior por utilizar valores altos de reflectancia y emisividad no fue suficiente para alcanzar condiciones de confort, sin embargo si hubo una reducción de las horas extremadamente no confortables. Torres-Aguilar et al. [8] reportaron los resultados obtenidos a partir de la simulación energética en un prototipo de vivienda de interés social en el estado de Hidalgo. Se analizaron distintos materiales para observar su comportamiento térmico y evaluar los beneficios energéticos y de confort térmico. La mayor reducción de temperatura se presento en la edificación con materiales típicos de la región. La eficiencia térmica de esta configuración aumento en un 35% con respecto a aquellas con materiales comerciales.

El objetivo de este trabajo es analizar los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia de calor en una recamara sometida a condiciones ambientales típica de la zona costera de Veracruz.

## 2. Descripción del problema

En el presente trabajo se reporta el estudio computacional del flujo de energía en el interior de una recamara real con techo de concreto y paredes de ladrillo rojo ubicada en el puerto de Veracruz. Las dimensiones son 4.27 m de largo (L), 3.12 m de ancho (A), 2.96 m de alto (H) y 0.16 m de espesor de pared (E), ver Fig. 1. La recamara está compuesta de 2 entradas y 1 salida, la entrada 1 es un ventanal doble. La mitad del ventanal es fijo el cual se considera como cristal sólido. La otra mitad es móvil. Las dimensiones de todo el ventanal son 1.80m x 2.20m. La entrada 2 es la puerta de la recamara con medidas de 2.08m x 0.73m, la salida es una ventana de 1m x 1.30 m ubicada en la parte lateral de la habitación opuesta a la entrada 1.

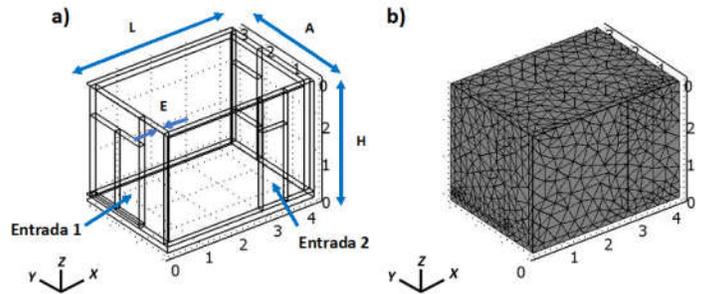


Fig 1. Geometría de la recamara estudiada. a) Detalle de la recamara analizada. b) mallado de la recamara

### A. Condiciones de frontera

Las simulaciones se realizaron para diferentes horas del día, desde las 6:00 hrs hasta las 18:00 hrs, incluyéndose en el modelo datos experimentales como condiciones de frontera. Estos datos fueron registrados en la Cd. de Veracruz y corresponde al día 15 de junio del 2016. En la Tabla 1 se muestran datos experimentales registrados para tres horas del día.

TABLA I. DATOS EXPERIMENTALES

hora	Tamb (°C)	Ts-C (°C)	Tb-C (°C)	Rad solar (W/m <sup>2</sup> )
7:00	28.196	30.463	29.981	159.791
13:30	41.965	58.798	51.853	877.815
17:00	37.416	40.667	40.622	181.810

### B. Propiedades físicas de los materiales

En las simulaciones se incluyeron propiedades reales de los materiales: aire, ladrillo, concreto, ver Tabla II.

TABLA II. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN EL MODELO MATEMÁTICO

Parámetro	valor	Descripción
$\rho_a$	1.23 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del aire

$\rho_{LR}$	1920 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad Ladrillo rojo
$C_{P LR}$	835 J/(Kg*K)	Calor específico Ladrillo rojo
$K_{LR}$	.72 W/(m*K)	Conductividad Térmica Ladrillo rojo
$C_{Pa}$	1007 Kg/m <sup>3</sup>	Calor específico del aire
$K_a$	.02514 W/(m*K)	Conductividad Térmica del Aire
$K_C$	1.4 W/(m*K)	Conductividad Térmica Concreto
$\rho_C$	2300 Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del Concreto
$C_{PC}$	880 Kg/m <sup>3</sup>	Calor Especifico del Concreto
$\epsilon$	0.94	Emisividad Concreto

9:00	33.19	32.85	1.03
13:00	44.92	44.29	1.42
15:00	46.31	45.63	1.49
18:00	34.57	34.12	1.32
19 Agosto 2015			
6:00	23.42	23.17	1.08
9:00	35.92	35.48	1.24
13:00	48.85	48.19	1.37
15:00	53.17	52.47	1.33
18:00	44.69	44.26	0.97

### C. Validación

Para validar los cálculos se hicieron simulaciones en cavidades de 0.60 × 80 m y se compararon con mediciones realizadas en prototipos con estas dimensiones los cuales forman parte del laboratorio de sistemas de generación de energía del Instituto Tecnológico de Veracruz, ver Fig. 2. En el prototipo con techo de concreto se realizaron mediciones de temperatura cada 30 minutos que se utilizaron como condiciones de frontera en el modelo de la simulación, las cuales incluyen: temperatura de la superficie superior de la losa de concreto, temperatura de la superficie inferior de la losa de concreto, y temperatura de la pared lateral, en la Tabla III se comparan las temperaturas inferiores del techo obtenidas numéricamente y mediante medición en el prototipo para dos fechas del año, observándose que los resultados coinciden muy bien.



Fig 2. Prototipo de habitación con techo de concreto

TABLA III. COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS INFERIORES EN LA LOSA DE CONCRETO OBTENIDA NUMÉRICAMENTE Y MEDIDAS EN EL PROTOTIPO

Tiempo (hrs)	Tci(°C) Medición	Tci(°C) Simulación	%error
17 Agosto 2015			
6:00	25.62	25.42	0.79

### D. Ecuaciones de conservación

Las simulaciones numéricas se realizaron en un dominio tridimensional  $\Omega$  que contiene una cavidad abierta donde se estudio el comportamiento de la dinámica de fluidos y la transferencia de calor. Las ecuaciones de conservación que describen el problema de un flujo turbulento, incompresible y Newtoniano en el interior de una cavidad abierta son la ecuación de cantidad de movimiento, la ecuación de continuidad y la ecuación de energía:

$$\frac{\partial(\rho U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho U_i U_j \right] + B_T \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{U_j T} \right] \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores P representa la presión,  $\rho$  es la densidad, U es la componente de velocidad,  $\mu$  es la viscosidad dinámica,  $B_T$  es la fuerza de cuerpo, T es la temperatura y Pr es el número de Prandtl. En la ec. 2, se aplica la aproximación de Boussinesq:

$$B_T = -\rho_{ref} g_i \beta (T - T_{ref}) \quad (4)$$

En la expresión anterior  $\beta$  es el coeficiente de expansión volumétrica. De acuerdo con el modelo de viscosidad de remolino a través de la hipótesis de Boussinesq, el tensor de esfuerzos de Reynolds y el flujo de calor turbulento se aproximan como:

$$\overline{\rho U_i U_j} = -\mu_t \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\overline{\rho U_j T} = -\frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (6)$$

Donde  $Pr_t$  es el número de Prandtl turbulento y  $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta dada por:

$$\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon} \quad (7)$$

La energía cinética turbulenta  $k$  y la rapidez de disipación de energía cinética turbulenta  $\varepsilon$ , se calculan resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + G_k - \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (9)$$

En las ecuaciones anteriores  $P_k$  es la rapidez de producción de energía cinética turbulenta y  $G_k$  es la generación o destrucción de turbulencia debido a las fluctuaciones de las fuerzas de cuerpo.

### 3. Resultados

En el presente trabajo se caracterizó el comportamiento térmico y de dinámica de fluidos del flujo de aire en el interior de una habitación. Los resultados se presentan en términos de los campos de temperatura, líneas de corriente, perfiles de temperatura y coeficientes de transferencia de calor para diferentes horas del día y para diferentes aperturas de la ventana de la habitación: ventana completamente abierta, semi abierta y abierta una cuarta parte.

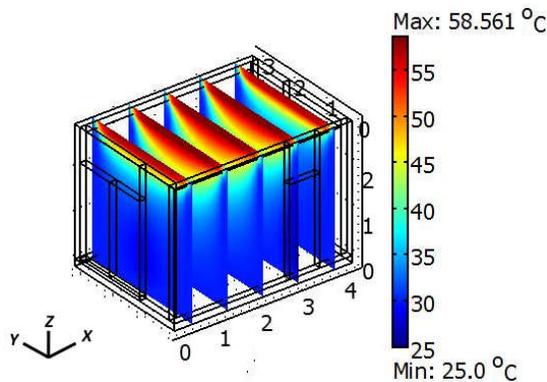


Fig 3. Campos de temperatura para el plano yz de la habitación con techo de concreto para las 13:50 hrs y la ventana abierta

El comportamiento de la temperatura, para el caso de la habitación con la ventana completamente abierta para las 13:50 horas, se muestra en la Fig. 3, observándose una temperatura en la superficie exterior del techo de concreto de 58.561 °C, el campo de temperatura indica que existe una mayor temperatura en la parte superior de la habitación mientras que la parte inferior el aire está más fresco debido a que la fuente de calor que es el techo se encuentra más alejado del piso. En la Fig. 4 se muestran las líneas de corriente que se generan al entrar el aire por la ventana y la puerta, la

simulación presenta vórtices asimétricos generados en la parte superior de la ventana y alrededor de la puerta de diferentes longitudes, la recirculación del aire con cambios de velocidad genera cambios de temperatura dentro de la habitación.

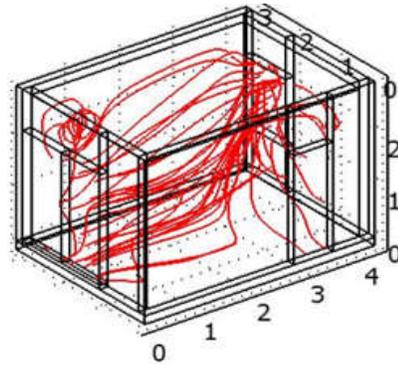


Fig 4. Líneas de corriente de la habitación con techo de concreto para las 13:50 hrs y ventana abierta

Para caracterizar con mayor precisión el comportamiento de la temperatura en el interior de la habitación, en la Fig. 5 se muestran los perfiles de temperatura en la habitación con techo de concreto para la configuración con ventana abierta a las 13:50 hrs. La Fig. 5a es el perfil de temperatura para la línea paralela al eje "x" trazada de  $(X=0, y=1.4, z=1.5)$  a  $(x=4.11, y=1.4, z=1.5)$ . La Fig. 5b es el perfil de temperatura para la línea paralela al eje "x" trazada de  $(X=0, y=2.5, z=1.5)$  a  $(x=4.11, y=2.5, z=1.5)$ . La figura 5a muestra en  $x=0.0$  m una temperatura de 25.0 °C, la cual corresponde al aire que está entrando en la ventana corrediza, a medida que el aire se mueve hacia el interior de la habitación, este se calienta hasta alcanzar 336.7477 °C en el centro de la habitación  $x=2.055$ . Posteriormente la temperatura desciende conforme se aproxima a la pared hasta alcanzar una temperatura de 30.7601°C. La figura 4.7b muestra una temperatura del aire de 30.0 °C correspondiente a la temperatura de la pared lateral del lado del ventanal, conforme el aire se mueve hacia el interior de la habitación, este se calienta hasta alcanzar 33.6497 °C en el centro de la habitación  $x=2.055$ . Posteriormente la temperatura desciende conforme se aproxima a la ventana de salida hasta alcanzar una temperatura de 31.1646°C. Otro parámetro importante que impacta en el confort de una habitación es la velocidad del aire. Los perfiles de velocidad en la habitación con techo de concreto para la configuración con ventana abierta a las 13:50 hrs se muestran en la Fig. 6. La Fig 6a es el perfil de velocidad para la línea paralela al eje "x" trazada de  $(X=0, y=1.4, z=1.5)$  a  $(x=4.11, y=1.4, z=1.5)$ . La Fig. 6b es el perfil de velocidad para la línea paralela al eje "x" trazada de

( $X=0,y=2.5,z=1.5$ ) a ( $x=4.11,y=2.5,z=1.5$ ). En la Fig. 6a se puede observar que el aire entra a 0.75 m/s, alcanza un primer máximo local y posteriormente se reduce la velocidad del aire hasta alcanzar un mínimo local de 0.3967 m/s en  $x= 2.5816$ , después el aire incrementa su velocidad hasta alcanzar un segundo valor máximo local debido al efecto de la segunda entrada de aire y posteriormente el aire disminuye su velocidad hasta un valor de cero en la pared. En la Fig. 6b se observa que la velocidad del aire es cero inicialmente debido a la pared, posteriormente se incrementa hasta alcanzar la ventana de salida de aire. El incremento de la velocidad del aire se vuelve significativo a partir de 2.75 m debido al efecto de la entrada de aire a través de la puerta.

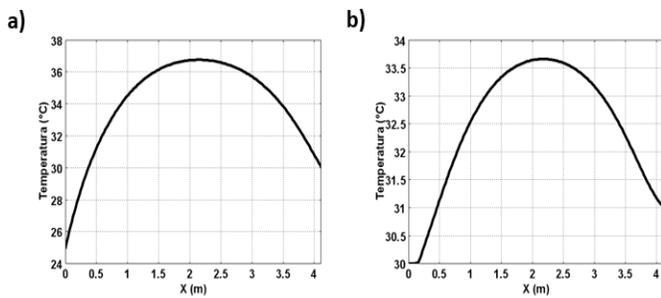


Fig. 5 Perfiles de temperatura a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:50 hrs y ventana abierta. a) Línea de ( $X=0,y=1.4,z=1.5$ ) a ( $x=4.11,y=1.4,z=1.5$ ) b) Línea de ( $X=0,y=2.5,z=1.5$ ) a ( $x=4.11,y=2.5,z=1.5$ ).

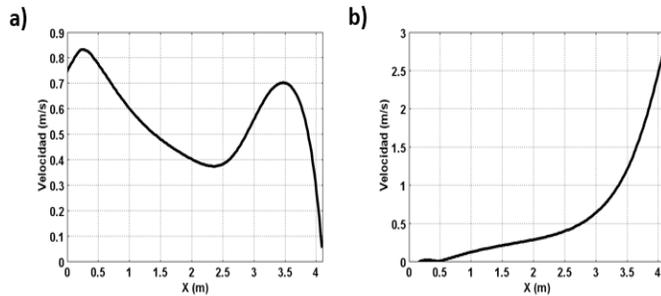


Fig. 6 Perfiles de velocidad a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:50 hrs y ventana abierta. a) Línea de ( $X=0,y=1.4,z=1.5$ ) a ( $x=4.11,y=1.4,z=1.5$ ) b) Línea de ( $X=0,y=2.5,z=1.5$ ) a ( $x=4.11,y=2.5,z=1.5$ ).

En la Fig. 7 se comparan los perfiles de temperatura para cinco diferentes horas del día en una línea con dirección paralela al eje "x". La línea se traza de ( $x1=0,y1=1.4,z1=1.5$ ) a ( $x2=4.11,y2=1.4,z3=2.5$ ) en el interior de la habitación de techo de concreto con el ventanal completamente abierto. En general se puede observar que la temperatura tiende a

incrementarse hacia el interior de la habitación, en  $x=0$  m la temperatura es de 25.0 °C y corresponde a la temperatura con la que entra el aire, mientras que en  $x=4$  m la temperatura es de 30.7 °C y corresponde a la temperatura de la pared en el lado de la ventana de salida de aire, esto se observa para todos los casos debido a las condiciones de frontera impuestas. Inicialmente a las 6 hrs de la mañana la temperatura en el interior de la habitación es la más baja, debido a que el techo no se ha calentado mucho, presentándose una temperatura promedio muy uniforme de 29.50 °C en el interior, posteriormente a las 8 hrs la temperatura se incrementa hasta alcanzar los 31.2018 °C en el centro. A las 13:50 hrs del día se alcanza la máxima temperatura de 36.7477°C en el centro de la habitación debido a que es el momento en el que el techo alcanza la máxima temperatura debido a la radiación solar. Para las 18 hrs de la tarde, la temperatura se reduce a 31.1579 °C en el centro debido a que los rayos del sol ya no son tan intensos y el techo comienza a reducir su temperatura.

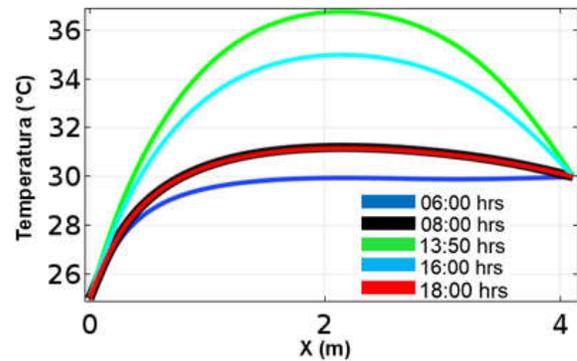


Fig. 7 Perfil de temperatura en dirección del eje "x" de ( $x1=0,y1=1.4,z1=1.5$ ) a ( $x2=4.11,y2=1.4,z3=2.5$ ) para cinco diferentes horas del día. Habitación con techo de concreto y ventana abierta.

En la Fig. 8 se compara los perfiles de temperatura para 3 diferentes casos de apertura de la ventana móvil para las 13:50 horas en una línea con dirección paralela al eje "x". La línea se trazó ( $x1=0,y1=1.4,z1=1.5$ ) a ( $x2=4.11,y2=1.4,z3=2.5$ ) en el interior de la habitación de techo de concreto, observándose que la temperatura es menor cerca de la ventana móvil cuando la ventana está completamente abierta y que en la mitad de la habitación en  $x=2$  m las temperaturas máximas son equiparables para todos los casos.

En la Tabla IV se muestra diferentes coeficientes de transferencia de calor obtenidos mediante simulaciones numéricas para las diferentes horas del día desde las 6 am hasta las 18 hrs. Estos coeficientes corresponden a la habitación con techo de concreto. El mínimo valor se obtuvo

para las 17:50 hrs y el máximo valor se obtuvo para las 7:00 hrs.

TABLA IV. COMPARATIVA DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN A DIFERENTES HORAS DEL DÍA.

hora	$h(w/m^2K)$
6.00	16
7:00	39
8.00	27
9:00	34
10:00	30
13.50	24
15:00	22
16.00	19
17:50	4
18.00	10

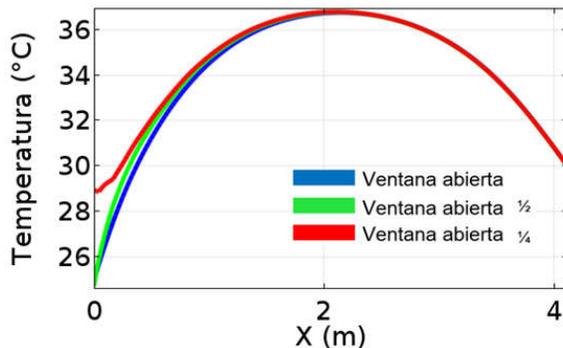


Fig. 8 Perfiles de temperatura a lo largo de dos diferentes líneas trazadas en el interior de la habitación en dirección del eje "x". Habitación con techo de concreto para las 13:50 hrs ventana abierta, ventana abierta  $\frac{1}{2}$  y ventana abierta  $\frac{1}{4}$ . a) Línea de  $(X=0, y=1.4, z=1.5)$  a  $(x=4.11, y=1.4, z=1.5)$

#### 4. Conclusiones

Continuamente el uso de métodos artificiales para lograr el confort térmico hace necesario el encontrar métodos de ahorro y uso eficiente de la energía. Para ello es importante analizar las configuraciones de las habitaciones a través de simulaciones y prototipos, en este trabajo se encontró mediante simulaciones numéricas que la temperatura interior en una habitación con techo de concreto es mayor en la mitad de la habitación y que esta desciende paulatinamente en la parte posterior de la habitación, mientras que el uso de una ventana ayuda a generar un ambiente fresco en algunas zonas, se encontró que el hecho de tener la ventana abierta parcial o

completamente solo genera un ambiente de confort en el primer metro de la habitación después de la ventana y que en la mitad de la habitación las temperaturas son similares.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen los apoyos otorgados por TNM-ITV, CONACyT y PRODEP. El alumno Lilly-Velázquez agradece la beca de posgrado otorgado por CONACyT

#### 6. Referencias

- [1] M. Gijón-Rivera, J. Xamán, G. Álvarez, J. Serrano-Arellano, Coupling CFD-BES Simulation of a glazed office with different types of windows in Mexico city, *Building and Environment*, vol. 68, pp. 22-34, 2013.
- [2] J. Xamán, G. Mejía, G. Álvarez, Y. Chávez, Analysis on the heat transfer in a square cavity with a semitransparent wall: Effect of the roof materials, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1920-1932, 2010.
- [3] J. Serrano-Arellano, M. Gijón-Rivera, J.L. Cháves-Servín, K. de la Torre-Carbot, J. Xamán, G. Álvarez, J. M. Belman-Flores, Numerical study of thermal environment of a greenhouse dedicated to amaranth seed cultivation, *Solar Energy*, vol. 120, pp. 536-548, 2015.
- [4] F. Noh-Pat, J. Xamán, G. Álvarez, M. Gijón-Rivera, I. Hernández-Pérez, J. Arce, E. Villanueva-Vega, Unsteady-RANS simulation of conjugate heat transfer in a cavity with a vertical semitransparent wall, *Computer and Fluids*, vol. 117, pp. 183-195, 2015.
- [5] N.A. Rodríguez, Z.C. Briceño, J.F. Hinojosa, Numerical study of heat transfer by convection and thermal radiation in a ventilated room with human heat generation and CO2 production, *Latin American Applied Research*, vol. 43, pp. 353-361, 2013.
- [6] A.C. Borbón, R.E. Cabanillas, J.B. Pérez, Modelación y simulación de la transferencia de calor en muros de bloque de concreto hueco, *Información Tecnológica*, vol. 21, pp. 27-38, 2010.
- [7] J. Lucero, Estudio comparativo de recubrimientos para techos y el efecto sobre el confort humano y uso de energía en México, Tesis de Doctorado, CIMAV, 2016.
- [8] C. Torres-Aguilar, J. Serrano-Arellano, E. Macías-Melo, B. Trejo-Torres, Simulación energética de prototipo de vivienda de interés social para evaluar el confort térmico, *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, vol. 3, pp. 83-89, 2016.

#### 7. Biografías

R. E. Lilly-Velázquez estudió Ingeniería Mecánica en el Instituto Tecnológico de Veracruz, actualmente es becario de CONACyT y se encuentra estudiando la Maestría en Eficiencia energética y Energías Renovables en la misma institución.

G. E. Ovando-Chacon es doctor en Ingeniería por la UNAM, profesor del Instituto Tecnológico de Veracruz con más de 10 años en el Sistema Nacional de Investigadores y perfil PRODEP.

S. L. Ovando-Chacon es doctora en Ciencias de los alimentos por el Instituto Tecnológico de Veracruz, profesora del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez con más de 10 años con perfil PRODEP y fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores por 7 años.

J. C. Prince-Avelino es doctor en Ingeniería por la Universidad de Cambridge, profesor del Instituto Tecnológico de Veracruz con más de 20 años en el Sistema Nacional de Investigadores y perfil PRODEP.

A. Rodríguez-León es doctor en Ingeniería computacional por la Universidad Politécnica de Valencia, profesor del Instituto Tecnológico de Veracruz con más de 10 años con perfil PRODEP y jefe del laboratorio de computo de alto rendimiento.

# Análisis de fatiga de la interacción fluido-estructura de un rotor de un generador eólico

Zeatti F. Mayra K.<sup>1, a</sup>, Castro G. Laura L.<sup>1, b</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAP. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa

<sup>a</sup> mayra.zeatti@gmail.com, <sup>b</sup> lauracg@uaem.mx

**Resumen**— La energía eólica ha tenido un crecimiento del 154% desde el 2013, ya que es una energía limpia y cuenta con un alto potencial eólico ubicados en todas las regiones de la República Mexicana ya que aprovecha la energía cinética contenida en las corrientes de aire para transformarla en energía eléctrica a través de aerogeneradores. En el presente trabajo se analiza un rotor de una turbina eólica de 2MW instalada en Baja California considerando la velocidad de viento y las temperaturas en cada estación del año de acuerdo a datos históricos, para el análisis en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), posteriormente realizar un análisis por elemento finito para conocer los esfuerzos los álabes y con esto conocer su vida útil (número de ciclos). Los resultados mostraron una distribución de esfuerzos en la raíz del ábabe obteniendo un límite de resistencia infinito con respecto a la curva S-N considerada.

**Palabras clave.** Turbina eólica, CFD curva de potencia, FSI, fatiga.

## 1. Introducción

De acuerdo a datos reportados por la Secretaria de Energía (SENER) al cierre del 2018, solo el 75.88% de la energía utilizada en la República Mexicana provino de combustibles fósiles: como el petróleo, carbón y gas natural, y la generación por energías limpias del 17.29%, siendo la hidroeléctrica la predominante y en segundo lugar la energía eólica con el 3.63%. Esta es una de las tecnologías con mayor crecimiento ya que en el 2013 se generaban solo 4,185 GWh y en 2018 se terminó con 10,620 GWh, teniendo un incremento del 154% [1]. México cuenta con un alto potencial eólico ubicados en las regiones Oriental(Oaxaca), Peninsular, Occidental, Baja California, Noroeste(Sonora) y Noreste (Tamaulipas) en las cuales, la velocidad del viento alcanza hasta los 12 m/s durante los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre, y actualmente existen 45 parques eólicos. [2]

Las centrales eólicas aprovechan la energía cinética contenida en las corrientes de aire y la transforma en energía eléctrica mediante las turbinas eólicas (aerogeneradores). Los aspectos importantes en una turbina eólica para su generación son: la velocidad y dirección de viento (fuerza de Coriolis), altura y temperatura [3]. Todos estos son determinantes para el aprovechamiento de las turbinas instaladas ya que para que empiece a funcionar se requiere una velocidad mínima de viento de 3-5 m/s para iniciar la rotación del rotor hasta alcanzar su potencia máxima a 12-15m/s.

El principal problema que enfrenta en la producción la energía eólica son los vientos dispersos y la fluctuación, por lo que se realizan cálculos de pronósticos de generación y demanda a la producción de energía. Pero una vez trabajando la turbina eólica ha presentado diversos tipos de accidentes mostrados en la Fig.1, de los cuales el 19% [4] fueron reportados por una falla en el aspa, la mayor causa han sido las tormentas (rayos); la cual provoca la fractura inmediata, la resonancia; provocada debido a la vibración que tiene el ábabe con la interacción de la torre-góndola [5], la presión máxima ejercida del viento, por defecto o mal diseño, en el transporte ó incendio.

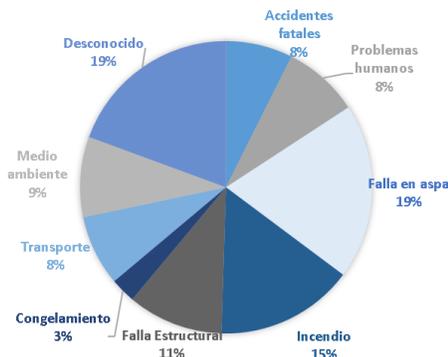


Figura 1. Diferentes tipos de accidente en una turbina eólica [4]

El diseño de un aspa es importante, ya que la estructura del ábabe trasmite las cargas producidas por el viento a la turbina eólica y este puede producir una disminución de la vida del aerogenerador. Se construyen de material compuesto de fibra de vidrio con resina, los cuales pueden resistir altas magnitudes de cargas pero por tiempo limitado. Este componente está sujeto a altos ciclos de carga  $> (10^3)$  identificados como fatiga.

En el presente trabajo se analiza el comportamiento estructural del aspa con material compuesto mediante una análisis de elemento finito (FEM, del inglés Finite Element Method) a partir de los resultados de un análisis en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, del inglés Computational Fluid Dynamics) y posteriormente con análisis de fatiga determinar la vida útil de la condición máxima de una turbina

instalada en un parque eólico al norte del país, comparándolos con valores de diseño y reasegurar su integridad del aspa durante su funcionamiento.

La Fig.2 muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada para el desarrollo del trabajo.

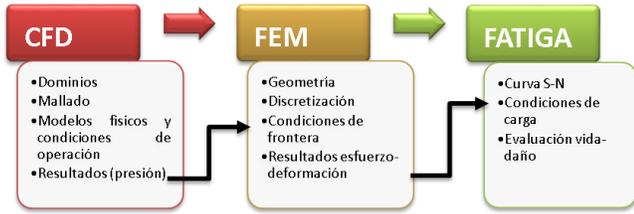


Figura 2. Diagrama de flujo para el desarrollo del trabajo.

### A. Turbinas eólicas

Las turbinas eólicas tienen su eje de rotación horizontal casi paralelo al flujo de viento, actualmente las de tres aspas son las principales turbinas que producen la energía eléctrica en todo el mundo. El movimiento rotacional producido por los álabes es transmitido por un eje conectado a una multiplicadora de velocidad para aumentar las revoluciones hasta un generador que es el encargado de la producción de la energía eléctrica. [3, 7]. Los componentes principales son: rotor, góndola y torre. El rotor incluye el buje y las palas.

La curva de potencia en una turbina es la que caracteriza su funcionamiento, ya que indica el rango de velocidades de viento en las que se puede operar y la potencia que genera. La potencia del viento depende del área de sección transversal expuesto a un flujo como se ilustra en la Fig.3, de la densidad del fluido y la velocidad del viento, dada por la ec. (1).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \tag{1}$$

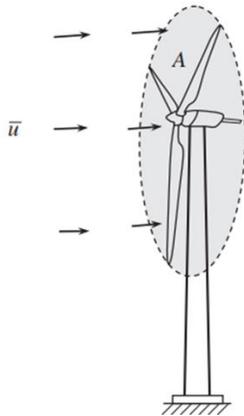


Figura 3. Área de barrido de las aspas de una turbina eólica [3].

La energía del viento no es aprovechada al 100%, tal como Albert Betz demostró. El límite que estableció fue del 59% para

un rotor ideal. Adicionalmente, la máquina tiene pérdidas mecánicas, eléctricas y aerodinámicas. [3,7-9].

### B. Análisis de fatiga

Los componentes mecánicos pueden estar expuestos a cargas repetidas por un tiempo siempre y cuando los esfuerzos permanezcan dentro del rango elástico. En ocasiones fallan por la acción de esfuerzos repetidos o fluctuantes un gran número de veces ocasionando la fractura, a este tipo de fallas se le conoce como falla por fatiga. [10]

Existen tres métodos que se usan en el diseño y el análisis de un componente cargado de forma cíclica por fatiga durante un periodo determinado para predecir la vida en número de ciclos hasta la falla, N, para un nivel específico de carga que son el método de esfuerzo-vida, deformación-vida y de mecánica de la fractura lineal elástica.

Para establecer la resistencia a la fatiga de un material, se necesita un gran número de ensayos, utilizando diferentes niveles de esfuerzo máximo, los datos resultantes se grafican como un diagrama de S-N. En la cual se observa que para un esfuerzo máximo aplicado alto se requieren pocos ciclos para causar la ruptura, sin embargo, cuando se reduce el esfuerzo máximo, el número de ciclos requeridos para causar la ruptura aumenta hasta que se alcanza un esfuerzo denominado el límite de resistencia o fatiga, el cual indica el esfuerzo donde la falla no ocurre, aun cuando haya un número infinitamente grande de ciclos de carga, donde inicia la región de vida infinita del material.

En las turbinas eólicas un análisis de fatiga es importante ya que por norma se debe garantizar la vida de 20 años de todos sus componentes [6].

## 2. Desarrollo

El presente trabajo se considera el rotor de una turbina eólica G87 de una capacidad de 2 MW para realizar el estudio del comportamiento del fluido por medio de CFD y del estudio de la estructura bajo distintas condiciones de operación con la herramienta Método de Elemento Finito utilizando el software de ANSYS ACADEMIC.

Para cada análisis se tiene las siguientes etapas en su respectiva plataforma:

- Pre procesamiento: generación de geometría y discretización.
- Procesamiento: aplicación de condiciones de frontera y condiciones de operación.
- Post procesamiento: generación de resultados

### C. Modelo CFD

Para el pre procesamiento, se generó la geometría del rotor en estudio a partir de información mostrada en la Tabla I. El archivo fue exportado a ICEM para la creación del dominio de flujo. El cual es dividido en dos dominios; rotatorio y estacionario. La Fig.4 muestra sus dimensiones, las cuales fueron establecidas de acuerdo al diámetro del rotor. [11]

La discretización en volúmenes finitos mediante un malla no estructurado tetraédrico.

TABLA I. CARACTERISTICAS DEL ROTOR

Turbina eólica G87	Dato
Diámetro	87 m
Área de barrido	5,945 m <sup>2</sup>
Velocidad de rotación	9-19 rpm
Perfil	FFA+W3
Longitud álabe	42.5 m
Vida según diseño	20 años

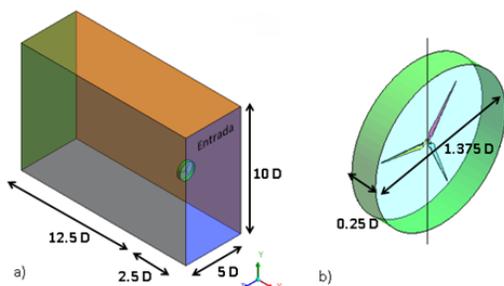


Figura 4. Dimensiones del dominio a) estacionario b) rotatorio

El cálculo numérico mediante CFD se llevó a cabo en el software ANSYS Fluent siendo un análisis en estado estacionario con las características de la Tabla II. [11, 14, 15]

TABLA II. CONFIGURACIÓN DEL RESOLVEDOR

Configuración	Dato
Tipo de análisis	Estacionario
Modelo de turbulencia	k $\omega$ -sst
Interfaces	Entrada, salida, contorno
Método de solución	SIMPLE
Condiciones de frontera	Entrada, salida, pared, simetría

La curva de potencia de diseño de la turbina eólica empieza con una velocidad de viento mínima de 4 m/s aumentando hasta su velocidad nominal de 13 m/s que se mantiene estable hasta los 25 m/s, la cual es la velocidad de desconexión por seguridad.

La metodología se validó realizando 14 análisis con un rango de velocidad de viento de 4-17 m/s utilizando las características antes descritas, obteniendo el torque de cada punto para el cálculo de la potencia mecánica con la ec. (2).

$$P = M\omega \quad (2)$$

La curva de potencia mecánica calculada está por encima de la potencia reportada por el fabricante encontrándose dentro del rango de pérdidas teórico [3, 8], debido a que el modelo de CFD no considera las pérdidas aerodinámicas que tiene la turbina, dando como resultado la validez de la metodología.

Se obtuvieron datos de la temperatura por cada estación del año para su análisis provenientes de datos históricos de un año: para primavera 20°, verano 38°, otoño 15° e invierno -5°C.

Las simulaciones se llevaron a cabo con la temperatura de la estación y el rango de velocidades de 4-13m/s, que de acuerdo al histograma presentado en la Fig. 5 es la zona de trabajo más representativa.

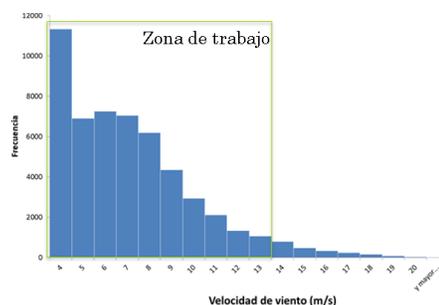


Figura 5. Histograma de frecuencia de la velocidad de viento durante un año de operación

### D. Modelo FEM

El presente trabajo se desarrolló la metodología en dos diferentes software; en Solidworks y Ansys Workbench (Design Modeler) para la geometría y en Ansys Workbench (Mechanical) la discretización, condiciones de frontera, propiedades de material, así como para el análisis de resultados.

La Fig.6 (a) ilustra la geometría del rotor que se generó con superficies [13, 15] de acuerdo a los datos de la Tabla I y la Fig.6(b) ilustra el espesor [16] impuesto a los alabes de la raíz a la punta de 50 a 8 mm a lo largo de la superficie.

El modelo numérico se muestra en la Fig. 7, el cual se realizó con elementos shell281 [17].

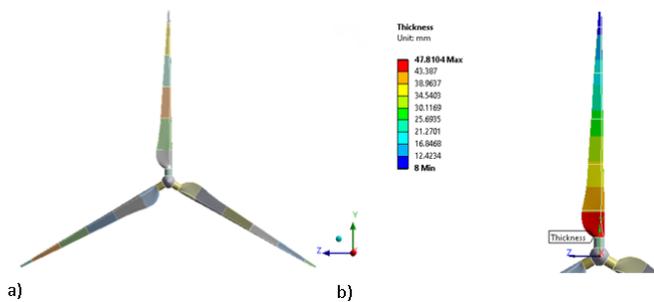


Figura 6. Características del rotor a) geometría b) distribución de espesor

El material compuesto del buje y del álabe se consideró como lineal por la composición unidireccional considerada [18].

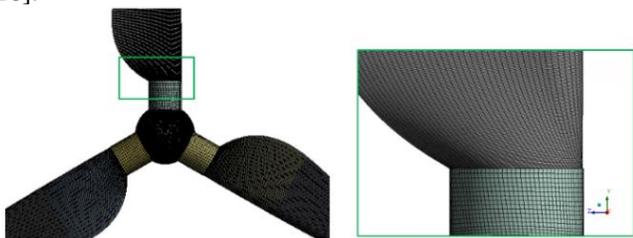


Figura 7. Modelo numérico del rotor

La sujeción del rotor por medio de pernos a la flecha de baja velocidad se representó como un soporte en la parte trasera del buje del rotor, además se adicióno la velocidad rotacional correspondiente. La Fig.8 muestra la dirección de la rotación a favor de las manecillas del reloj (Clockwise).

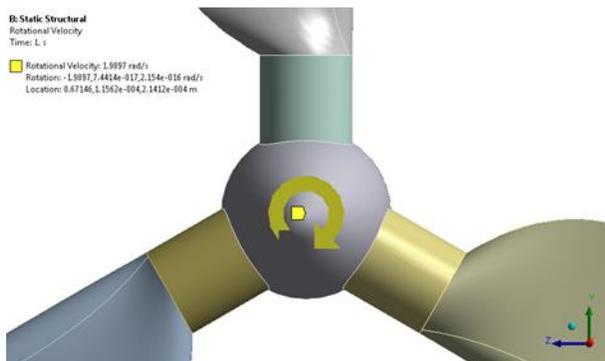


Figura 8. Velocidad rotacional a favor de las manecillas

Adicionalmente se incluyen los resultados de presión de la evaluación en CFD, importados a Mechanical para el análisis estructural de cada uno de los análisis mediante una interpolación del mallado de ICEM al mallado generado en Ansys Workbench para la parte estructural.

#### E. Modelo fatiga

Para la evaluación de la estimación de daño por fatiga y consumo de vida útil del rotor, se desarrolla un análisis por

fatiga mediante el empleo del módulo 'Fatigue Tool' de Ansys Workbench (Mechanical) considerando el modelo FEM para la realización del análisis. Este análisis es estimado a partir de la curva S-N, diagrama de Goodman, la carga y los ciclos de diseño [19], considerando el método de esfuerzo-vida.

El esfuerzo medio y el esfuerzo alternante para calcular el número de ciclos con la teoría de Goodman es calculado por el programa de acuerdo a las siguientes formulas: las ec. (3).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (3)$$

La curva S-N del material compuesto unidireccional considerado para el análisis se muestra en la Fig. 9. Donde el límite de resistencia a la fatiga es a  $10^8$  teniendo su correlación con el esfuerzo 22,500 psi aproximadamente.

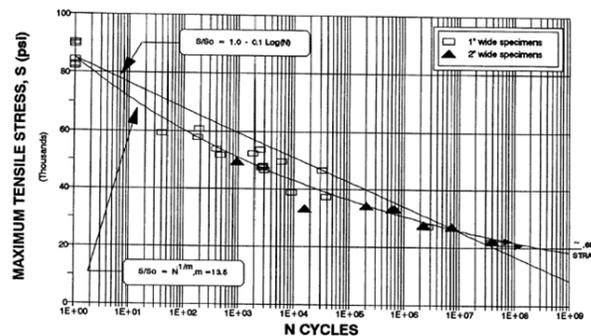


Figura 9. Curva S-N [20]

La carga considerada es la condición máxima obtenida de los análisis estructurales, considerando el histograma de las velocidades de viento presentadas en el año conocido.

Los ciclos de diseño considerados son calculados a partir de los años de diseño de acuerdo a la norma como se muestra en la ec (4).

$$(20 \text{ años}) \left( \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right) \left( \frac{24 \text{ horas}}{1 \text{ día}} \right) \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} \right) \left( \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \right) = [(630,720,000 \text{ seg}) * 19 \text{ rpm}] = 1.99 \times 10^8 \text{ ciclos} \quad (4)$$

#### F. Resultados

Los resultados de las simulaciones de los análisis de CFD y FEM se presentan a continuación, mostrando la potencia mecánica simulada, las presiones, los resultados de esfuerzos y vida respectivamente.

#### G. Modelo CFD a diferentes condiciones de operación

Se calculó la potencia calculada a partir del momento obtenido en los análisis de CFD de las 40 simulaciones, una por

cada velocidad de viento en el rango de operación de 4-13m/s, a las diferentes temperaturas correspondientes a las estaciones del año. Donde se observa que la temperatura afecta directamente a la potencia calculada, por ende influye la densidad del aire [21].

Los resultados la presión total obtenida de los diferentes análisis es que se importara en el análisis estructural para obtener esfuerzos mecánicos.

### H. Modelo FEM a diferentes condiciones de operación

Se realizó un análisis a las diferentes velocidades de rotación de 9-19 r.p.m. reportado por el fabricante. Obteniendo como límite inferior un esfuerzo máximo de 8.5 MPa y con el límite superior 37.9 MPa. Los resultados a la velocidad máxima se obtuvieron en la interacción de la raíz del alabe con el cilindro y el desplazamiento máximo encontrándose en la punta del aspa.

### I. Modelo fluido-estructura

Las presiones obtenidas de CFD fueron exportadas a ANSYS Mechanical a cada velocidad de viento para su análisis estructural, adicionando las condiciones de frontera mencionadas para obtener un estado de esfuerzos.

La Fig. 10 muestra el estado de esfuerzos a diferentes temperaturas en el rango de velocidades predominantes de 4-13m/s. Se observa que a los 38° durante el verano los esfuerzos menores que durante el invierno que se tiene los -5°C. La fuerza centrífuga aporta el 30% aproximadamente del esfuerzo total con la presión ejercida del aire sobre la superficie del rotor.

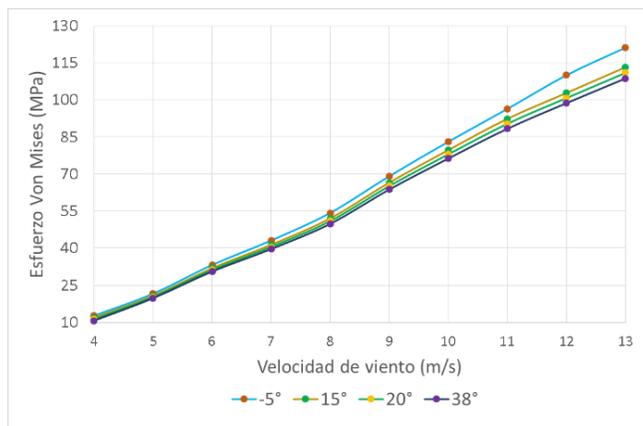


Figura 10 – Esfuerzo de Von Mises a diferentes temperaturas

La distribución de esfuerzos de Von Mises de 120.39MPa a la velocidad de viento máximo de 13m/s se muestra en la Fig. 11(a), el cual la zona de la raíz del álabe es el afectado por la flexión que tiene la punta del aspa. La Fig. 11(b) ilustra el desplazamiento máximo localizado en la punta del álabe, donde por el efecto del giro y la presión del aire entrando normal a la superficie afecta a la zona con el espesor mínimo.

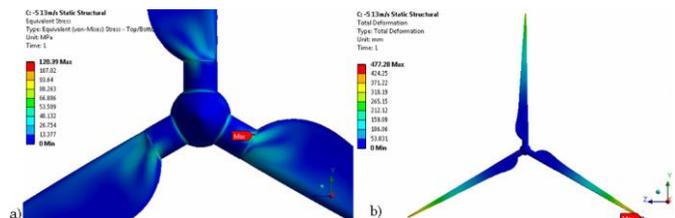


Figura 11 – Resultados a 13m/s. a) estado de esfuerzos de Von Mises b) desplazamiento máximo

### J. Modelo fatiga a la condición máxima

La condición máxima de acuerdo a los resultados FEM son obtenidos a una velocidad de 13m/s y una temperatura de -5°C. La Fig. 12 muestra la distribución de esfuerzos principales máximo y mínimo considerados para el análisis.

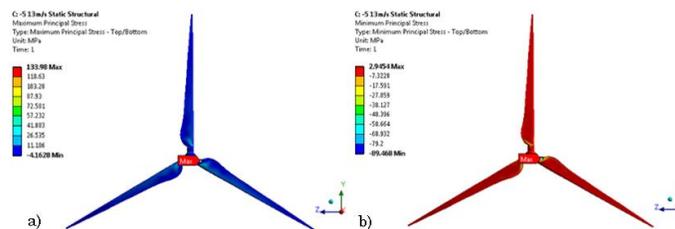


Figura 12 – Resultados a 13m/s. a) esfuerzo principal máximo b) esfuerzo principal mínimo

De acuerdo a los esfuerzos calculados y propiedades del material, el número de ciclos calculado por el programa de acuerdo a las consideradas antes mencionadas nos indica que tiene una vida infinita si tuviera esas condiciones de trabajo en toda la superficie del rotor como se ilustra en la Fig. 13.

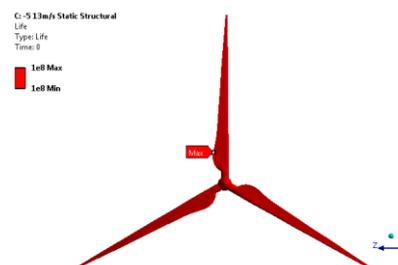


Figura 13 –Distribución global de la resistencia a la fatiga [número de ciclos] del rotor calculado a 13m/s y -5°C

El daño de un componente se calcula a partir de la división de los ciclos de diseño entre los ciclos de vida calculada en el programa como se muestra en la ec (5). El cual para el rotor no existe daño con la condición de operación ejercida en la pared del alabe.

$$D = \frac{N_d}{N_c} \quad (5)$$

### 3. Conclusiones

En el presente trabajo se validó la metodología de CFD al comparar los resultados con la potencia reportada del fabricante, obteniendo una aproximación aceptable, tomando en cuenta la idealidad del caso en estudio.

Se realizaron las cuarenta simulaciones de CFD a las temperaturas de las estaciones del año para la obtención de las presiones para los análisis estructurales para determinar el esfuerzo máximo de 120 MPa en el análisis a una velocidad de 13m/s, siendo menor a 38°C y mayor a -5°C, localizado principalmente en la raíz del ábabe debido al cambio de espesor, así como velocidad de rotación y la presión ejercida por el aire. Este esfuerzo no excede el esfuerzo de cedencia de 240 MPa.

Se realizó el análisis de fatiga del rotor obteniendo resultados favorables, ya que con los esfuerzos en la estructura del ábabe que es de material compuesto derivados de la presión de una velocidad de viento de 13m/s, se obtuvo un límite de resistencia infinito con respecto a la curva S-N considerada. El cual nos muestra que de acuerdo a datos reales del parque, a la condición máxima extrema en temperatura y velocidad de viento presentada no tendrá problemas en la estructura.

Este trabajo se utilizará para estudios posteriores, se realizarán simulaciones a condiciones de resonancia para determinar en cual podría suceder un esfuerzo que dañara al rotor.

### Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico mediante el otorgamiento de una Beca SENER-CONACYT con número de CVU 864234 y número de apoyo 496079.

### 4. Referencias

- [1] SENER<Reporte de Avance de Energías Limpias Primer Semestre 2018 México 2018> México (2018)
- [2] SENER, <Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032>, México (2018).
- [3] W. Tong, Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press (2010).
- [4] Jui-Sheng Chou, et. al. (2013) <Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads> Engineering Failure Analysis 27 (2013) 99–118
- [5] Wei-Hua Hu, et. al. (2014) <Resonance phenomenon in a wind turbine system under operational conditions> Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EUROODYN 2014
- [6] C. Kong, et. al. (2005).<Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life>, Energy 30 (2005) 2101–2114

- [7] A. P. Schaffarczyk <Introduction to Wind Turbine Aerodynamics> Springer (2014)
- [8] J.M. Escudero López, <Manual de energía eólica>, Ediciones Mundi-Prensa (2004).
- [9] A. Betz, <La energía eólica y su aprovechamiento mediante molinos de viento>, Vandenhoeck Rupr (1926).
- [10] Richard G. Budynas et. al. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mc Graw Hill.
- [11] Borja Plaza, Rafael Bardera, Sergio Visiedo, <Comparison of BEM and CFD results for MEXICO rotor aerodynamics>, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 145 (2015) 115–122.
- [12] Ming-Chen Hsu, Yuri Bazilevs, <Fluid–structure interaction modeling of wind turbines: simulating the full machine>, Comput Mech (2012) 50:821–833
- [13] J.M.O'Brien, T.M. Young, D.C. O'Mahoney, P.C. Griffin, <Horizontal axis wind turbine research: A review of commercial CFD, FE codes and experimental practices>, Progress in Aerospace Sciences, 92 (2017) 1–24.
- [14] R. Lanzafame, S. Mauro, M. Messina, <Wind turbine CFD modeling using a correlation-based transitional model>, Renewable Energy 52 (2013) 31-39
- [15] Liping Dai, Qiang Zhou, Yuwen Zhang, Shigang Yao, Shun Kang, Xiaodong Wang, <Analysis of wind turbine blades aero elastic performance under yaw conditions>, Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics 171 (2017) 273287.
- [16] Jin Chen, Quan Wang, Wen Zhong Shen, Xiaoping Pang, Songlin Li, Xiaofeng Guo, <Structural optimization study of composite wind turbine blade>, Materials and Design 46 (2013) 247–255
- [17] ANSYS, User's Guide, ANSYS 16.
- [18] Dong-Hoon Kim, O-Kaung Lim, Eun-Ho Choi, Yoojeong Noh, <Optimization of 5-MW wind turbine blade using fluid structure interaction analysis>, Journal of Mechanical Science and Technology 31 (2) (2017) 725-732
- [19] C. Kong, et. al (2005) <Structural investigation of composite wind turbine blade considering various load cases and fatigue life> Energy 30 (2005) 2101–2114
- [20] J. F. Mandell, et. al. (1992). <Fatigue of fiberglass wind turbine blade materials>. Sandia National Laboratory contractor report SAN 92-7005, Montana State University.
- [21] Abolfazl Pourrajabian, et. al, <Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran> J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 126 (2014) 1–10

### 5. Biografías

Mayra Karina Zezatti Flores

Nacida en el Distrito Federal. Realizó sus estudios de Ingeniería Mecánica en la Facultad Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQeI) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM). Actualmente se encuentra estudiando el posgrado en Sustentabilidad Energética en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP). Ha trabajado en diferentes proyectos en el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias en el área de turbomaquinaria, energías renovables e ingeniería civil, así como docente en la FCQeI.

Laura Lilia Castro Gómez

Nacida en el Distrito Federal. Realizó sus estudios de licenciatura en la Facultad Ciencias Químicas e Ingeniería (FCQeI) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM), obteniendo el título en Ingeniería Química. El posgrado también lo cursó en la UAEM, obteniendo maestría y doctorado en Mecánica. Su experiencia laboral se centra en investigación en el área termofluidos y turbomaquinaria. Su línea de investigación y especialización es: "Medición Experimental de Flujo, Estudio de Transferencia de Calor y Dinámica de fluidos Computacional (CFD)". Actualmente es Profesora Investigadora de Tiempo Completo en el Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), ha participado en diferentes proyectos para la industria y CONAcYt, así como una co-edición de un libro de Medición de Flujo, tiene diversos artículos publicados en revistas indexadas en el JCR.

# Diseño hidráulico del rodete de una turbina horizontal de flujo axial para generar 5kw

R. Gómez-Mejía<sup>1,a</sup>, A.R. Torres-García<sup>1,b</sup>, G. Urriolagoitia-Sosa<sup>1,c</sup>, B. Romero-Ángeles<sup>1,d</sup>, G. Urriolagoitia-Calderón<sup>1,e</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Unidad Profesional Adolfo López Mateos "Zacatenco", Edificio 5 2do. Piso, Col. Lindavista, C.P. 07300, Ciudad de México

<sup>a</sup>rafaelgm920202@gmail.com, <sup>b</sup>abraham.torres.g@live.com, <sup>c</sup>guiurri@hotmail.com <sup>d</sup>romerobeatriz97@hotmail.com <sup>e</sup>urrio332@hotmail.com

**Resumen**—El sector de las energías renovables en México tiene una perspectiva de crecimiento sostenido. Esto debido principalmente a factores como la accesibilidad de la red de transmisión eléctrica actual y a que las grandes cantidades de gases contaminantes que emanan del uso de energías no renovable, han llegado a niveles alarmantes. De ahí que el sector de energías renovables se presente como una gran oportunidad para suplir la demanda energética de una manera sostenible. El presente trabajo, se centra en el desarrollo y aprovechamiento de la energía hidráulica, mediante el diseño de una turbina que genere una cantidad relativamente baja de energía eléctrica, pero suficiente para alimentar a 5 casas con un uso promedio de energía eléctrica, siempre teniendo en mente que el diseño sea apto para un caudal relativamente bajo y fácil de encontrar en gran parte del territorio mexicano.

**Palabras clave.** Energías renovables, sostenible, hidráulica, turbina.

**Abstract**— The renewable energy sector in Mexico has a perspective of sustained growth, this mainly due to factors such as the accessibility of the current electricity transmission circuit and the large amounts of polluting gases that emanate from the use of non-renewable energies, have reached alarming levels. Hence, the renewable energy sector is presented as a great opportunity to meet energy demand in a sustainable manner. The present work focuses on the development and use of hydraulic energy, through the design of a turbine that generates a relatively low amount of electrical energy, but enough to feed 5 houses with an average use of electricity, always keeping in mind that the design is suitable for a relatively low flow and easy to find in much of the Mexican territory.

**Keywords.** Renewable energy, sustainable, hydraulic, turbine.

## 1. Introducción

Una turbina hidráulica es una turbomáquina hidráulica motora. Esto quiere decir que absorbe la energía cinética y potencial de un fluido. La cual, por medio de un generador, convierte la energía mecánica en eléctrica para su uso industrial o doméstico. Desde *Arquímedes de Siracusa* se han hecho grandes avances en el campo de la hidráulica [1], pasando por el imperio romano donde se tienen las primeras referencias detalladas de la rueda hidráulica o también llamada *molino romano*, el molino de rueda vertical de paletas más comúnmente denominado *molino tipo vitruviano* [2]. Posteriormente, es hasta el año de 1800, donde la energía hidráulica adquiere mayor importancia a causa de la revolución industrial. En esta época el Carbón era insuficiente y la madera poco aprovechable como combustible, es entonces que la energía hidráulica facilita el crecimiento de nuevas ciudades industriales que tuvieron sus orígenes en Europa y América [3]. Este hecho impulsa aún más el

desarrollo de turbinas hidráulicas cada vez más eficientes [3]. En Francia *Benoit Fourneyron* (1801-1867) desarrolla el trabajo de su mentor *Claude Burdin* (1778-1873) que le había valido el premio en un concurso a la fabricación de una turbina realmente eficiente, el desarrollo del trabajo dio como resultado la *turbina Fourneyron* [4]. La principal aportación de *Fourneyron* fue un distribuidor que dirige el fluido hacia las aspas de la turbina. Este tipo de turbina junto con la *turbina Jonval* y la *turbina Fontaine* fueron los modelos más utilizados en su época. Actualmente, han sido remplazados por los modelos *Pelton*, *Francis*, *Deriaz* y *Kaplan* [5], de los cuales hay un amplio campo de investigación, estas turbinas han logrado ser aprovechadas para grandes centrales hidroeléctricas como La presa de las Tres Gargantas en China o La central hidroeléctrica de Itaipú, ubicada entre Brasil y Paraguay [6, 7 y 8].

La generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables tiene una clara tendencia en México y el mundo. Particularmente en México existe un entorno jurídico favorable y condiciones físicas idóneas para la generación de energías de este tipo. El caso de la energía hidroeléctrica tiene un gran potencial en el país debido a que se cuenta con 51 ríos principales y sus cuencas cubren el 65 % de la superficie territorial continental del país. Actualmente México cuenta con 101 centrales de generación, y existe una clara tendencia de crecimiento, pero todas estas centrales solamente 9 generan cantidades menores a 1 kw esto quiere decir que todavía existe un gran potencial para aprovechar la capacidad hidrológica del país, implementando el uso de turbinas hidráulicas capaces de aprovechar bajos caudales y bajas alturas [9,10 y 11].

El diseño de una turbina hidráulica de flujo axial contempla una serie de elementos (Figura 1). De los cuales los que toman mayor relevancia son el diseño del rodete, el difusor y el tubo de succión, mecánicamente es también importante el diseño del generador y los componentes como rodamientos y flecha, etc. El rodete es el elemento que está en contacto directo con el fluido, y el que transfiere la energía del fluido al eje que posteriormente entregará esa energía al generador, la cual transforma en energía eléctrica, dicho esto el presente trabajo se centra en realizar un diseño que tenga la capacidad de transmitir la mayor cantidad de energía posible, con la menor cantidad de pérdidas [12].

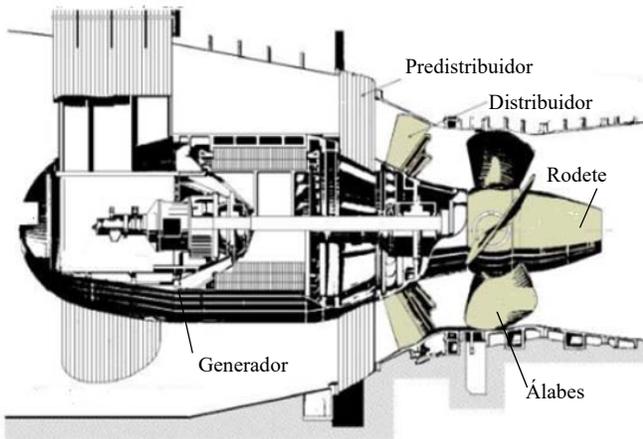


Fig 1. Partes principales de una turbina hidráulica de flujo axial.

## 2. Desarrollo

### Parámetros de diseño

A continuación, se realizará el diseño del rodete de una turbina para cubrir una demanda de 5 kw, las condiciones base para el diseño, han sido tomadas en cuenta contemplando la demanda de electricidad promedio de un pequeño conjunto de 6 casas habitación. La cual es de 0.650 kw/ individualmente, que en conjunto nos da como resultado 3.9 kw, las condiciones propuestas de flujo son 1.5 m de altura y una velocidad angular de 300 rpm.

### Selección del tipo de turbina

Una de las variables más comúnmente utilizadas para definir una turbina es la velocidad específica, la cual se encuentra relacionada directamente con la potencia de la misma, su velocidad angular y la altura neta del salto hidráulico y se rige por la siguiente ecuación [12]:

$$n_s = \frac{n\sqrt{P}}{H^{5/4}} \quad (1)$$

Dónde;  $n$  = número de revoluciones por minuto (rpm),  $P$  = Potencia requerida en CV y  $H$  = altura neta o altura de diseño (m).

De tal forma la ecuación anterior aplicada a las condiciones antes mencionadas queda de la siguiente manera:

$$n_s = \frac{300\sqrt{6.705}}{(1.5)^{5/4}} = 467.95rpm$$

En la Tabla I se puede observar la información que muestra valores para el diseño de una turbina de hélice, como son el número de aspas, la relación de diámetros o relación de cubo y la altura del salto, esto en función del número específico de revoluciones [13].

Tabla I.- Valores para el diseño de una turbina en función del número específico de revoluciones

	Altura (m)					
	5	20	40	50	60	70
Número de aspas	3	4	5	6	8	10
$d/D$	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.7
$n_s$	1000	800	600	400	350	300

### Diseño del rodete

Para el cálculo del rodete se deberá calcular en primera instancia el caudal que se rige por la siguiente ecuación [13]:

$$Q = \frac{P}{(\rho)(H)(\eta)} \quad (2)$$

$$Q = \frac{5000}{(9810)(1.5)(0.90)} = 0.377m^3/s$$

Mediante los datos de la Tabla I y la ecuación de Earl Logan (ecuación 3) es posible relacionar el valor del caudal con los diámetros del rodete. La expresión para calcular el caudal va en función de los diámetros del rodete y una de las componentes de la velocidad absoluta del fluido a la entrada del rodete.

$$Q = \frac{\pi(D^2-d^2)V_{ax}}{4} = \left(\frac{\pi}{4}\right)(D^2 - d^2)\varphi(2gH)^{1/2} \quad (3)$$

Para facilitar la solución de la ecuación se contemplará el factor de flujo mínimo y máximo que propone Earl logan [13]. Para este tipo de turbinas hidráulicas, el flujo mínimo es de 0.35 y el flujo máximo es de 0.75, en este caso se tomará el punto medio que es  $\varphi = 0.55$ .

Por lo tanto, siendo  $\varphi_{min} = 0.55$  y considerando  $d/D = 0.5$  basado en la velocidad específica y la Tabla I, se tiene que:

$$\begin{aligned} 0.377m^3/s &= \left(\frac{\pi}{4}\right)(D^2 - 0.5D^2)0.55(2 * 9.81m/s^2 \\ &\quad * 1.5m)^{1/2} \\ \frac{0.377m^3/s}{\left(\frac{\pi}{4}\right)0.55(2 * 9.81m/s^2 * 1.5m)^{1/2}} &= (0.5D^2) \\ 0.160m^2 &= (0.5D^2) \end{aligned}$$

Diámetro mayor (D):

$$0.567m = D$$

Diámetro menor (d):

$$d = 0.5(0.567m) = 0.283m$$

Conociendo los diámetros es posible ahora determinar las velocidades radiales y absolutas, para posteriormente con estos datos conocer los ángulos de entrada y salida. Se debe considerar que para obtener la mayor eficiencia la componente radial de la velocidad absoluta del fluido a la salida ( $C_{2u}$ ) deberá ser cero. Utilizando el factor  $c$

correspondiente a las turbinas de hélice la velocidad  $c_1$  queda de la siguiente manera [13].

$$V_1 = c\sqrt{2(g)(H)} \quad (4)$$

$$c_1 = 0.8\sqrt{2(9.81m/s^2)(1.5m)} = 4.339m/s$$

Sustituyendo el diámetro mayor ( $D$ ) y el diámetro menor ( $d$ ) en la siguiente ecuación se obtienen las velocidades tangenciales de salida y de entrada respectivamente [14].

$$U = \frac{\pi(Dn)}{60} \quad (5)$$

Velocidad de salida:

$$U_2 = \frac{\pi(0.567m * 300rpm)}{60} = 8.906m/s$$

Velocidad de entrada:

$$U_1 = \frac{\pi(0.283m * 300rpm)}{60} = 4.445m/s$$

Utilizando la componente meridional de la velocidad absoluta del fluido ( $C_{m1}$ ) la cual se mantiene constante, se podrán determinar algunos ángulos. Siendo  $C_{m1} = C_{m2} = 2.983$  m/seg. De tal forma que para calcular el ángulo de entrada del fluido ( $\alpha_1$ ) se tiene [14]:

$$\alpha_1 = \text{sen}^{-1} \frac{c_{m1}}{c_1} = 43.431^\circ \quad (6)$$

Con el ángulo de entrada del fluido, se calcula la componente periférica de la velocidad absoluta del fluido, la cual queda de la siguiente forma [14]:

$$c_{1u} = c_1 \cos \alpha_1 = 3.15m/s \quad (7)$$

La diferencia de la velocidad absoluta de entrada y la componente periférica de la velocidad absoluta del fluido da como resultado la componente radial de la velocidad relativa del fluido [14].

$$W_{1u} = u_1 - c_{1u} = 1.295m/seg \quad (8)$$

Para conocer el ángulo de inclinación del álabe a la entrada ( $\beta_1$ ) se tiene lo siguiente [14]:

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{c_{m1}}{w_{1u}} = 66.533^\circ \quad (9)$$

Como se mencionó con anterioridad, con la intención de obtener un mayor rendimiento la componente radial de la velocidad absoluta ( $C_{2u}$ ) es cero. Siendo así, se entiende que el ángulo  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Por lo tanto, para la obtención del ángulo  $\beta_2$  se realizará lo siguiente [14]:

$$\beta_2 = \tan^{-1} \frac{c_{m2}}{u_2} = 13.354^\circ \quad (10)$$

## Número de álabes del rodete

El número de álabes en una turbina axial está relacionado con la altura neta  $H$  y con el número específico de revoluciones ( $n_s$ ) y la relación de cubo ( $v$ ), factores de los cuales también depende el que exista o no cavitación. Por tal motivo, al determinar el número de álabes se deberá tener estos factores en cuenta. Los cuales se muestran en la Tabla II.

Tabla II.- Valores para el diseño del rodete

Datos de diseño del rodete	
$D$ (Diámetro exterior)	0.567 m
$d$ (Diámetro interior)	0.283 m
$\alpha_1$	43.431°
$\alpha_2$	90°
$\beta_1$	66.533°
$\beta_2$	18.517°
$c_1$	4.339 m/s
$C_{m1}$	2.983 m/s
$U_1$	4.445 m/s
$U_2$	8.906 m/s

Basado en la altura del salto y la velocidad específica de la turbina, se observa en la Tabla I que el número de álabes oscila entre 3 y 6, considerando que a mayor altura mayor es el riesgo de cavitación, se optará por cuatro álabes en el rodete. De forma ordenada se presentan en la Tabla II, los datos obtenidos del cálculo del rodete. Asimismo, en la Figura 2 se muestran de manera gráfica los triángulos de velocidades resultantes del cálculo del álabe y una representación del perfil del mismo [15].

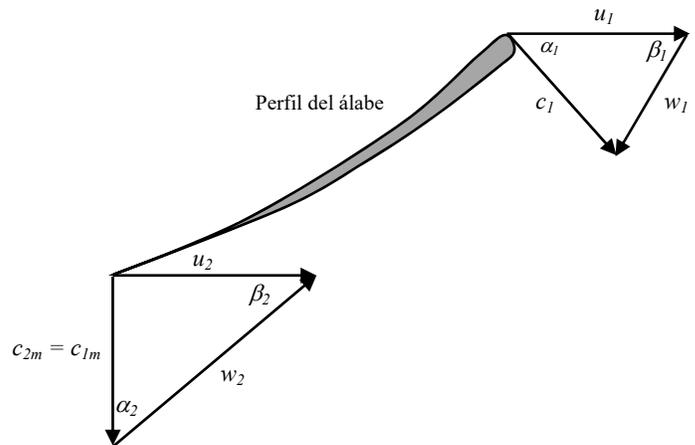


Fig 2. Perfil del álabe y sus triángulos de velocidades.

Para conocer más a detalle las velocidades y ángulos del álabe, con la intención de posteriormente realizar el diseño del rodete por el método de *Weining* es necesario conocer los radios. Estos corresponden a 5 secciones, número impar con

la intención de que uno de los radios sea el radio medio, de modo que considerando lo siguiente [15]:

Número de secciones; 5,  $D = 0.567\text{ m}$ ,  $r_e = 0.283\text{ m}$ ,  $d = 0.283\text{ m}$ ,  $r_i = 0.141\text{ m}$ . Se tiene que:

$$\Delta r = \frac{r_e - r_i}{5} = 0.0284 \quad (11)$$

Por lo tanto, los radios de sección son los siguientes:

$$\begin{aligned} r_1 &= 0.141\text{ m} \\ r_a &= r_1 + 0.028 = 0.169\text{ m} \\ r_b &= r_a + 0.028 = 0.197\text{ m} \\ r_c &= r_b + 0.028 = 0.225\text{ m} \end{aligned}$$

A partir de los radios es posible determinar mediante las ecuaciones siguientes, las velocidades y ángulos para las todas las secciones necesarias, los resultados se presentan en las siguientes tablas.

Tabla III.- Velocidades tangenciales a lo largo del álabe (m/s)

Ecuación	Velocidades (m/s)	
$U = \frac{\pi(Dn)}{60}$	$U_1$	4.445
	$U_{1,2}$	5.309
	$U_{1,3}$	6.188
	$U_{1,4}$	7.068
	$U_2$	8.890

Para determinar el componente de la velocidad periférica es necesario conocer el rendimiento hidráulico, que está dado por la siguiente ecuación [13]:

$$\eta_h = \frac{(U_1 * c_{1u}) - (U_2 * c_{2u})}{g * H} \quad (12)$$

$$\eta_h = \frac{(4.445 \frac{m}{s} * 3.15 \text{ m/s}) - 0}{9.81 \frac{m}{s} * 1.5\text{ m}} = 0.951$$

Tabla IV.- Componente periférico de velocidades absolutas a lo largo del álabe (m/s)

Ecuación	Velocidad (m/s)	
$c_{1u} = \frac{\eta_h * g * H}{U_1}$	$c_{1u}$	3.148
	$c_{1u2}$	2.635
	$c_{1u3}$	2.261
	$c_{1u4}$	1.979
	$c_{2u}$	1.574

Tabla V.- Ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  en las diferentes secciones del álabe (grados)

Ecuación	Ángulos $\alpha$ y $\beta$ (grados)	
$\alpha_1 = \cos^{-1}(\frac{c_{1u}}{c_1})$	$\alpha_1$	43.488
	$\alpha_{1,2}$	52.606
	$\alpha_{1,3}$	58.594
	$\alpha_{1,4}$	62.864
	$\alpha_{1,5}$	68.730

$\beta_1 = \tan^{-1}(\frac{c_{1m}}{u_1 - c_{1u}})$	$\beta_1$	66.500
	$\beta_{1,2}$	48.126
	$\beta_{1,3}$	37.220
	$\beta_{1,4}$	30.377
	$\beta_{1,5}$	22.128
$\beta_2 = \tan^{-1}(\frac{c_{2m}}{u_2})$	$\beta_2$	33.865
	$\beta_{2,2}$	29.330
	$\beta_{2,3}$	25.736
	$\beta_{2,4}$	22.881
	$\beta_{2,5}$	18.548

Tabla VI.- Componente periférica de velocidades absolutas a lo largo del álabe (m/s)

Ecuación	Velocidad (m/s)	
$w_1 = \frac{c_{1m}}{\sin \beta_1}$	$w_1$	3.252
	$w_{1,2}$	4.006
	$w_{1,3}$	4.931
	$w_{1,4}$	5.898
	$w_{1,5}$	7.900

Basados en la potencia requerida y el rendimiento hidráulico obtenido, se determina la velocidad específica para generar dicha potencia. Este dato será de utilidad para poder conocer la altura, curvatura y la cantidad de álabes que serán necesarios [13].

$$\begin{aligned} n_s &= 3.65 * \sqrt{\eta_h} * n \quad (13) \\ n_s &= 3.65 * \sqrt{0.951} * 300\text{ rpm} = 1067\text{ rpm} \end{aligned}$$

Algunas dimensiones principales se obtienen tomando como base estudios de turbinas *Kaplan* de doble regulación. De tal forma que se establecerán por medio de las ecuaciones que se muestran a continuación, dando como resultado las dimensiones que se muestran en la siguiente figura [15].

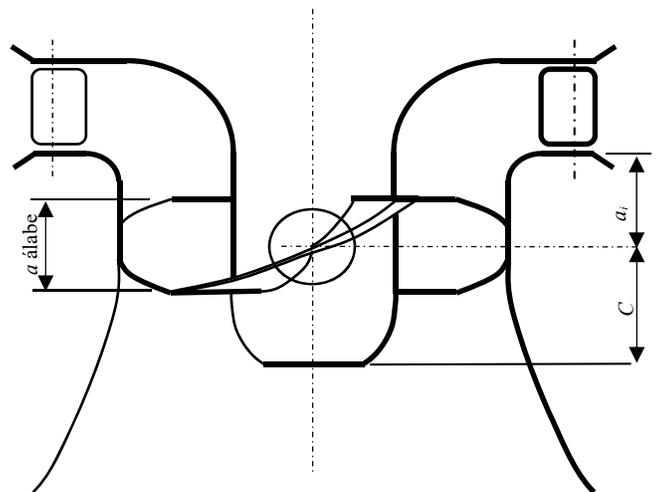


Fig 3.- Dimensionamiento del álabe.

$$C = (6.94 * n_s^{-0.403}) * D_e \quad (14)$$

$$C = (6.94 * (1067rpm)^{-0.403}) * 0.567m = 0.236m$$

$$a_i = (0.38 + (5.17 + 10^5 * n_s)) * D_e \quad (15)$$

$$a_i = (0.38 + (5.17 * 10^{-5} * 1067rpm)) * 0.567m = 0.246m$$

$$\alpha_{\text{álabe}} = \frac{1}{3} * (C + a_i) \quad (16)$$

$$\alpha_{\text{álabe}} = \frac{1}{3} * (0.236 + 0.246m) = 0.160m$$

Si se realizara un corte en una sección coaxial al rodete y esta se desarrolla sobre un plano, se observaría una imagen como la que se muestra a continuación. Acorde con esta disposición la teoría de reja de álabes en una corriente uniforme de flujo, permite determinar la solidez de los álabes de la forma siguiente. Para conocer la distancia entre los álabes o paso, se contempla la siguiente ecuación [15].

$$t = \frac{\alpha_{\text{álabe}}}{\tan(\beta_{1,5})} \quad (17)$$

$$t = \frac{0.160m}{\tan(22.182^\circ)} = 0.392m$$

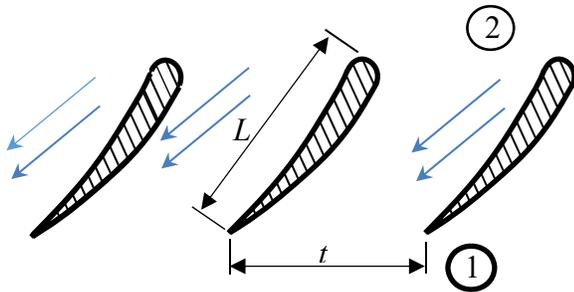


Fig 4.- Disposición de los álabes en una corriente uniforme de flujo.

Ahora bien, el número de álabes que conforman el rodete estará dado por la siguiente ecuación, aunque ya fue mencionado con anterioridad, mediante este método se corrobora que la elección anterior es la mejor opción de diseño [15]:

$$Z = \frac{\pi * D}{t} \quad (18)$$

$$Z = \frac{\pi * 0.567m}{0.392m} = 4.544 \cong 4$$

La longitud de la cuerda deberá definirse en las secciones en las que se dividió el álabe en un principio, de tal forma se tiene que [17]:

$$L_i = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{álabe}}}{2 * \text{sen}(\beta_1)} + \frac{\alpha_{\text{álabe}}}{2 * \text{sen}(\beta_2)}\right)^2 + \alpha_{\text{álabe}}^2} \quad (19)$$

Tabla VII.- Longitudes de la cuerda del álabe

Ecuación	Longitudes (m)	
$L_i = \sqrt{\left(\frac{\alpha_{\text{álabe}}}{2 * \text{sen}(\beta_1)} + \frac{\alpha_{\text{álabe}}}{2 * \text{sen}(\beta_2)}\right)^2 + \alpha_{\text{álabe}}^2}$	$L_1$	0.280
	$L_2$	0.314
	$L_3$	0.354
	$L_4$	0.397
	$L_5$	0.490

Para concluir con los datos necesarios para dimensionar el álabe se utiliza el método de *Weining*, el cual permite encontrar la curvatura del perfil en cada sección del álabe, mediante la ecuación que se presenta a continuación [15]:

$$R_{c1} = \frac{l_1}{\sqrt{2 * (1 - \text{sen}(\alpha_1))}} \quad (20)$$

Tabla VIII.- Radios de la curvatura del álabe

Ecuación	Radios (m)	
$R_{c1} = \frac{l_1}{\sqrt{2 * (1 - \text{sen}(\alpha_1))}}$	$R_{c1}$	0.354
	$R_{c2}$	0.489
	$R_{c3}$	0.653
	$R_{c4}$	0.846
	$R_{c5}$	1.327

Para evitar el contacto entre los álabes se requiere encontrar el ángulo de amplitud, considerando la superposición de estos cuando el rodete se encuentre en el par mínimo [15]:

$$\alpha_{\text{álabe}} = \frac{Z^2 * \theta * l_5 - \theta * D * \pi}{Z^2 * l_5} \quad (21)$$

$$\alpha_{\text{álabe}} = \frac{1.5^2 * 68.744 * 0.490 - 68.744 * 0.567 * \pi}{1.5^2 * 0.490} = -42.46^\circ$$

### 3. Resultados

A continuación se muestran de forma ordenada los datos obtenidos en el presente trabajo, para el dimensionamiento del rodete.

Tabla IX.- Resultados de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  en las diferentes secciones del álabe (grados)

Ángulos $\alpha$ y $\beta$ (grados)	
$\alpha_1$	43.488
$\alpha_{1,2}$	52.606
$\alpha_{1,3}$	58.594
$\alpha_{1,2}$	62.864
$\alpha_{1,5}$	68.730
$\alpha_2$	90.00
$\beta_1$	66.500
$\beta_{1,2}$	48.126
$\beta_{1,3}$	37.220
$\beta_{1,4}$	30.377
$\beta_{1,5}$	22.128
$\beta_2$	33.865

$\beta_{2,2}$	29.330
$\beta_{2,3}$	25.736
$\beta_{2,4}$	22.881
$\beta_{2,5}$	18.548

Tabla X.- Resultados de longitudes de la cuerda del álabe

Radios (m)		Longitudes (m)	
$R_{c1}$	0.354	$L_1$	0.280
$R_{c2}$	0.489	$L_2$	0.314
$R_{c3}$	0.653	$L_3$	0.354
$R_{c4}$	0.846	$L_4$	0.397
$R_{c5}$	1.327	$L_5$	0.490

Paso de los álabes  $t = 0.392m$

Numero de álabes  $Z=4$

Ángulo de amplitud  $\alpha_{álabe} = -42.46^\circ$

#### 4. Conclusiones

El rendimiento hidráulico teórico obtenido en el presente trabajo se encuentra dentro de los parámetros aceptados para las turbinas axiales y es suficiente para alimentar a 5 casas con un uso promedio de energía eléctrica.

En conjunto la relación que existe entre los diámetros del rodete, el número de álabes y sus respectivos ángulos, que como consecuencia resultan en un aumento en la velocidad de salida de la turbina, muestra claramente la factibilidad del diseño del rodete para el aprovechamiento de la energía cinética del fluido, por consiguiente hacen del diseño presentado una opción práctica para la generación de energía hidroeléctrica.

El número de álabes que se proponen en el diseño del rodete es el adecuado, aunque la velocidad específica muestra que lo más adecuado sería un número de álabes cercano a 6, y la altura del salto se acerca más al número mínimo de álabes que son 3. Finalmente se optó por el punto intermedio más cercano al mínimo que es 4, dato que se corrobora por medio de la ecuación 18 la cual involucra tanto el paso de los álabes como su diámetro, por tal motivo se corrobora también el diseño de los mismos.

#### 5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de la Ciudad de México por el apoyo brindado en la elaboración de este trabajo.

#### 6. Referencias

- [1] Edward Parra S., Arquímedes: su vida, obras y aportes a la matemática moderna, Revista digital Matemática, Educación e Internet (www.cidse.itcr.ac.cr/revistamate/). Vol. 9, No 1., pp 1-5, 2009.
- [2] Juan Palomo Palomo, María Pilar Fernández Uriel, Los molinos Hidráulicos en la Antigüedad, Espacio, Tiempo y Forma, Serie II, Historia Antigua, t. 19-20, pp 499-524, 2006-2007.
- [3] Delgado de Cantú, G. M., El Mundo Moderno y Contemporáneo, Ed. Pearson Education, pp 236-238, 2005.
- [4] Paul N. Wilson, Early Water Turbines in the United Kingdom, Transactions of the Newcomen Society Volume 31, 1957.
- [5] Manuel Polo Encinas, Turbomaquinas Hidráulicas, Ed. Limusa, pp 113-216, 1989.
- [6] Levi, E., El Agua Según la Ciencia, Ed. AMH-IMTA, 2001.
- [7] Mott, R. L., Mecánica de Fluidos, Ed. Pearson Educación, pp 1-3, 2006.
- [8] García, N., Ingeniería del Agua en los Códices de Leonardo y en los Manuscritos Españoles del Siglo XVI; Ingeniería del Agua, Vol. 3, Ed. Akal, pp 17-38, 1996.
- [9] Pedro Joaquín Coldwell, Prospectiva de energías renovables 2017-2031, Secretaría de energía, pp 12-44, 2017.
- [10] Subdirección General de Planeación CONAGUA, Atlas de agua en México 2015, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua, 2015.
- [11] CEMIE-Hidro, Bases para un Centro Mexicano en Innovación de Energía Hidroeléctrica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, pp 21-50, 2017.
- [12] Claudio Mataix. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas, Segunda Edición, Ed. ICAI, pp. 33-64, 1986.
- [13] Earl Logan, Jr, Ramendra Roy, Handbook of Turbomachinery Second Edition, Arizona State University Tempe, Arizona, U.S.A. pp 895-904, 2003.
- [14] Gonzalo Orozco Aceves, Diseño y construcción de un tipo de turbina para la generación de energía eléctrica en una microplanta, Ed, Instituto Politécnico Nacional, pp 51-55, 2011.
- [15] Pérez-Piero, P., Diseño de Turbina Kaplan, Ed. Pontificia Universidad Católica del Perú, pp 32-55, 2007.

#### 7. Biografías

Rafael Gómez Mejía: Ingeniero Mecánico especialidad en Hidráulica, egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco del IPN, estudiante del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica especialidad de Diseño Mecánico.

Abraham Román Torres García: Ingeniero Mecánico especialidad en Diseño Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacán del IPN, estudiante del programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica especialidad de Diseño Mecánico.

Beatriz Romero Ángeles: Ingeniero Mecánico egresada de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco del IPN, Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica en Diseño mecánico egresada de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) del IPN y Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica por la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) del IPN.

Guillermo Urriolagoitia Sosa: Ingeniero Mecánico egresado de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco del IPN, Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en 2 programas de posgrado, uno de ellos en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI ESIME Zacatenco) del IPN y la otra Maestría en Ciencias en el Reino Unido en la Oxford University y PhD (Doctorado en Philosophy) en Oxford Brookes University en el Reino Unido.