Científica

ISSN
2594-2921

Científica: The Mexican Journal of Electromechanical Engineering · Volumen 24 Número 2 · edición semestral: julio-diciembre 2020 · México · www.cientifica.esimez.ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
«La Técnica al Servicio de la Patria»

Instituto Politécnico Nacional
México
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 2594-2921

volumen 24, número 2, julio-diciembre 2020

The Mexican Journal of Electromechanical Engineering

DIRECTORIO

Guillermo Urriolagoitia Calderón
Editor en Jefe

Christopher René Torres San Miguel
Coeditor

Alma Vicenta Miranda Godínez
Coordinadora Editorial

Cuauhtémoc Jiménez Pérez
Editor Técnico

Martín Luis Octavio Vázquez Cajiga
Página Web

Indizada en:

Redalyc: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.
www.redalyc.org

Latindex: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica:
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
www.dgbiblio.unam.mx

Contenido

Análisis y modelo para la asignación del despacho y el costo de potencia reactiva de generación de la GCROR
Model to Determine the Dispatch and Cost of Reactive Power Generation of the GCROR in a Released Electricity Market
O. Fernández-Galindo, J. L. Mar-Villegas, J. C. Escamilla-Sánchez
G. Campos-Castillo, I. Albino-Padilla | **México** 83-96

Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm, mediante un sistema de rejilla Bragg de fibra óptica sintonizada por tensión mecánica
Suppression of an Infrared Emission Line at 1550 nm Using a Bragg Fiber Optic Rating System, Tuned by Mechanical Stresst
R. Benítez-Álvarez | **México** 97-101

Modelado para la determinación del poder calorífico de la gasificación de la balsa en instalaciones downdraft mediante redes neuronales artificiales
Determination of the Calorific Power Value of the Balsa Wood through Artificial Neural Networks Modeling in a Downdraft Gasification Facility
E. B. Ibarra-Sánchez, A. L. Oñate-Chiliquinga, A. H. Villavicencio-Poveda | **México** 103-110

Estado del arte, optimización del modelo RLC y retos de fabricación de interconectores para alta frecuencia con base en nanotubos de carbono
State-of-the-art RLC Model Optimization and Fabrication Challenges of High-Frequency Carbon Nanotube-Based Interconnectors
I. Larruz-Castillo, A. Pacheco-Sánchez, D. Valdez-Peréz | **México** 111-123

Evaluación de sistemas eólicos en el Caribe
Evaluation of Wind Systems in the Caribbean
G. Becerra, J. Hernández, E. Osorio, J. O. Aguilar, J. Vazquez | **México** 125-133

Medición de la eficiencia y temperaturas en un transformador tipo seco que alimenta a un rectificador trifásico no controlado
Measurement of efficiency and temperatures in a dry type transformer that feeds a three-phase uncontrolled rectifier
J. A. Álvarez-Salas, J. Segundo-Ramírez, V. M. Cárdenas-Galindo, R. Álvarez-Salas | **México** 135-142

Modelado de orden fraccional de la dinámica de robots manipuladores de 1, 2 y 3 GDL
Fractional Order Model of the dynamic of manipulate-robots of 1,2 & 3 DOF
I. Cerón-Morales | **México** 143-152

Obtención y caracterización de capas de elevada dureza sobre fundiciones nodulares, mediante técnicas de difusión termorreactiva
Obtaining and characterization of high hardness layers on Ductile Irons by means of Thermoreactive Diffusion techniques
D. G. Agredo-Diaz, A, Barba-Pingarrón, D. Sánchez-Ruiz, J. R. González-Parra, R. G. Valdez-Navarro
J. J. Olaya-Florez, C. A. González-Rodriguez, I. Angarita-Moncaleano | **México** 153-159

Resistencia a la compresión de la laja tipo salmón procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México
Compressive strength of the slate type Salmón from San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, Mexico
A. M. Morales-Tassinari, E. Gómez-Alonso, M. Zárate-Reyes | **México** 161-170

Solución numérica del flujo transitorio en tanques cilíndricos horizontales producido por la inyección de aire con tres toberas
Numerical Solution of the Transient Flow in Horizontal Cylindrical Tanks Produced by the Injection of Air with Three Nozzles
A. Lizardi-Ramos, H. Terres-Peña, R. López-Callejas, M. Vaca-Mier, S. Chávez-Sánchez | **México** 171-178

Comité Editorial

Edison Bonifaz
Universidad San Francisco de Quito (ECUADOR)

Jinhui Shao
University of Shuo (JAPÓN)

Juan Alfonso Beltrán Fernández
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Ku Zilati Ku Shaari
Universiti Teknologi Petronas (MALASIA)

Luis Héctor Hernández Gómez
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Manuel Elices Calafat
Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA)

María Teresa Alonso Rasgado
University of Manchester (REINO UNIDO)

Marco Ceccarelli
University of Cassino (ITALIA)

Mokhtar Awang
Universiti Teknologi Petronas (MALASIA)

Rômulo Maziero
Universidade Federal de Minas Gerais (BRASIL)

Silvia González Prolongo
Universidad Rey Juan Carlos (ESPAÑA)

Editores Asociados

Apolinar Reinoso Hernández
Centro de Investigación y de Estudios Superiores de Ensenada
(MÉXICO)

Baltasar Mena Inesta
Universidad Nacional Autónoma de México
(MÉXICO)

Édgar Sánchez Sinencio
Texas A&M University College Station
(ESTADOS UNIDOS)

Francisco Sánchez Sesma
Universidad Nacional Autónoma de México
(MÉXICO)

Garret Sautis
University de Shieffield
(REINO UNIDO)

Guillermo Urriolagoitia Sosa
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Hidilberto Jardón Aguilar
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Israel Sauceda Meza
Universidad de Baja California
(MÉXICO)

Joaquín Fernández Valdivia
Universidad de Sevilla
(ESPAÑA)

José de Jesús Álvarez Ramírez
Universidad Autónoma Metropolitana
(MÉXICO)

José Luis del Río Correa
Universidad Autónoma Metropolitana
(MÉXICO)

Manuel A. Duarte Marmoud
Universidad de Chile (CHILE)

Michael Shapiro Fihman
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Miguel Ángel Rodríguez Díaz
Instituto de Física de Cantabria
(ESPAÑA)

Miguel Castro Fernández
Centro de Investigación y Pruebas
Electromagnéticas de Cuba (CUBA)

Pablo Rogelio Hernández Rodríguez
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Rafael Castro Linares
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Régulo López Callejas
Instituto Nacional de
Investigaciones Nucleares (MÉXICO)

Valery Kontorovich
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados (MÉXICO)

Víctor Champac Vilela
Instituto Nacional de Astrofísica,
Óptica y Electrónica (MÉXICO)

Victor Kravchenko
Moscow Institute of Physics
and Technology (FEDERACIÓN RUSA)

Vladislav Kravchenko
Centro de Investigaciones
y Estudios Avanzados
Querétaro (MÉXICO)

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 2594-2921

volumen 24, número 2, julio-diciembre 2020

La Revista Mexicana de Ingeniería Electromecánica

The Mexican Journal of Electromechanical Engineering

Científica, Año 24, Número 2, julio-diciembre de 2020, es una publicación semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional a través de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Av. Luis Enrique Erro S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México, Tel. +52 55 57296000 ext. 54518, http://www.cientifica.esimez.ipn.mx, Editor responsable: Dr. Guillermo Urriolagoitia Calderón. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo 04-2018-021313432600-203, ISSN 2594-2921, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización: Martín Luis Octavio Vázquez Cajiga, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Av. Luis Enrique Erro S/N, Edificio 5, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Col. Zacatenco, Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México. Fecha de la última modificación: 30 de octubre de 2020.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. La reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes se permite con fines no lucrativos, siempre y cuando se cite la fuente completa; su uso para otros fines, requiere previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

EDITORIAL

Científica presenta el segundo semestre del volumen 24 y publica diez artículos de investigación que cubren las disciplinas que le competen, se agradece la gestión para conformar este número a los profesores-investigadores: Dr. David Sebastián-Baltazar, Dr. Fermín Pascual Espino-Cortés, Dr. Juan Gabriel Barbosa-Saldaña y Dr. Erick Velázquez-Lozada; quienes con sus conocimientos disciplinares permitieron la selección de los mejores trabajos del XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019.

Como contexto del primer artículo: desde el año 2013, México liberó su sector energético y con ello incursiona en el modelo de Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). En este contexto, los servicios en red que son necesarios para realizar el servicio de transmisión de energía llamados servicios auxiliares, tales como la potencia reactiva de generación, la cual debido a su particularidad de tener un efecto local entran en la polémica de ¿cómo deben administrarse?, ¿quién debe dar el servicio? y ¿cuánto debe pagarse por el servicio?, estas son algunas controversias que surgen al liberar un sector eléctrico. Este artículo de investigación propone utilizar un método estocástico denominado Optimización de Enjambre de Partículas (OEP) que se aplica en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con el propósito de obtener un despacho de potencia reactiva eficiente que dé seguridad y confiabilidad al SEP, una vez determinado este escenario se puede aplicar la metodología propuesta para obtener el costo de potencia reactiva para cada generador. El método OEP puede obtener una solución rápida teniendo como consigna tener un despacho de potencia reactiva eficiente respetando bandas de voltaje en buses con el mínimo de pérdidas eléctricas, usando la red eléctrica del Operador Independiente de Sistema CENACE, en un nivel de voltaje de 400 kV. Las principales conclusiones de esta investigación: la administración eficiente de potencia reactiva usando OEP, reduce las pérdidas eléctricas al mínimo.

Una de las características más importantes del análisis espectroscópico es la posibilidad que nos ofrecen las técnicas e instrumentos para explorar las estructuras atómicas y moleculares de algunos compuestos químicos, analizando el efecto directo sobre los fotones de la radiación utilizada para la interacción de materia y energía. Actualmente con el desarrollo de las tecnologías de miniaturización de componentes electrónicos basados en óxido de silicio, es posible diseñar dispositivos ópticos, que partiendo de las leyes de la fotónica, amplían aún más el campo de oportunidad científico y tecnológico de estas técnicas de análisis. En *Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm, mediante un sistema de rejilla Bragg de fibra óptica sintonizada por tensión mecánica* se muestra el diseño de un sistema multicanal basado en fibras de óxido de silicio SiO_2 a los cuales se les imprime una variación en el índice de refracción, con el propósito de ser utilizados como filtros para suprimir líneas de emisión en longitudes de onda particulares; se muestra el resultado en una longitud de onda de interés para las telecomunicaciones a 1550 nm y se describe un diseño conceptual de convertidor multifibra para su fabricación con tecnología de micromaquinado.

En el tercer trabajo se presentan los principales resultados investigativos obtenidos por los autores en el modelado para la predicción del poder calorífico del gas de síntesis obtenido en instalaciones de gasificación termoquímica downdraft de la madera de balsa, con la incorporación de técnicas basadas en redes neuronales artificiales. Se realizó un análisis del estudio del estado del arte de trabajos de investigación previos vinculados al modelado matemático de estas instalaciones por las diferentes técnicas reflejada en la literatura especializada. El modelado se lleva a cabo mediante una planificación experimental 3^n, con lo que se obtuvo los datos experimentales a los cuales se aplican técnicas de predicción mediante redes neuronales con ayuda de Matlab con resultados satisfactorios. La selección de variables para realizar la experimentación toma en cuenta la ubicación geográfica de donde se obtiene el residuo forestal de la balsa, ya que esta se produce en un clima tropical cálido-húmedo. Por literatura se conoce que uno de los factores que influye notablemente en el poder calorífico es la humedad. Obviamente la cantidad oxígeno contenida en el aire en el proceso es regulada por una válvula de admisión, además de que es un factor preponderante

la masa añadida al proceso. Teniendo en cuenta esto, la red neuronal artificial obtenida permite la predicción del poder calorífico resultante de la gasificación de la balsa con un error de ± 2.6 MJ/g y un ajuste del 86%, lo cual permite realizar una predicción adecuada.

En E*stado del arte, optimización del modelo RLC y retos de fabricación de interconectores para alta frecuencia con base en nanotubos de carbono* se hace una revisión bibliográfica sobre las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono (CNT) en altas frecuencias y como han sido implementados como interconectores en diferentes dispositivos. Se muestran los resultados de dichas implementaciones y se analizan para su interpretación. De la bibliografía revisada, se selecciona un modelo RLC de interconectores con base en CNT y se hace un estudio del mismo. Se obtiene una función para la impedancia del dispositivo y utilizando los valores teóricos sugeridos para el modelo RLC, se extiende su análisis en altas frecuencias (<100 GHz). A partir de la representación matricial tipo ABCD de los componentes del circuito equivalente, se calculan las ecuaciones de los parámetros de dispersión (S) para este dispositivo. A partir de esta ecuación característica se realiza una optimización de los componentes del circuito RLC hacia una correcta descripción de los datos experimentales del dispositivo. Por último, se discuten los retos en la fabricación de interconectores con base en CNT.

El crecimiento económico de la población está ligado fuertemente con el consumo de energía, en los últimos años, el mencionado aumento se relacionaba también con las emisiones de CO_2. Hoy en día, la principal transformación de energía se enfoca a la producción de electricidad, sin embargo, la transformación de energía eléctrica, mediante fuentes fósiles ha dejado una huella importante en el planeta. De las principales alternativas en años recientes, se ha dedicado gran potencial a estudiar y aprovechar la energía proveniente del sol, así como el uso del viento que finalmente es una transformación más de la absorción de energía solar. Por otro lado, el uso eficiente de la energía eólica tiene múltiples retos por resolver como fuente de generación eléctrica y, particularmente, en la Universidad de Quintana Roo se estudian diferentes vertientes, para lograr su uso con el mayor provecho de la mencionada fuente de energía limpia. En el quinto artículo se describen algunos modelos para la representación de aerogeneradores, experimentos mediante un túnel de viento con una turbina de viento y el recurso eólico local.

En *Medición de la eficiencia y temperaturas en un transformador tipo seco que alimenta a un rectificador trifásico no controlado* se presentan las pruebas que se realizaron en un laboratorio a un transformador tipo seco de capacidad de 5 kVA, el cual alimenta a un rectificador trifásico y una carga resistiva conectada en estrella. El propósito es evaluar el comportamiento de la eficiencia cuando en el transformador circulan corrientes no sinusoidales debido a la presencia del rectificador trifásico. Por medio de las mediciones de potencia se calculó la eficiencia en el transformador, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2014. Se presentan resultados y gráficas del comportamiento de la eficiencia. Con el rectificador trifásico en las terminales del transformador se produce una distorsión armónica de las corrientes en los devanados, lo que permitió analizar la modificación del factor K a medida que se incrementó la carga resistiva en el rectificador. Adicionalmente se realizan mediciones de temperatura en el transformador mediante dos termopares que se encuentran incluidos entre los devanados y su núcleo, se presentan gráficas comparativas de las mediciones de temperatura.

El séptimo manuscrito publicado presenta el modelado de orden fraccional de la dinámica de robots manipuladores de 1, 2 y 3 grados de libertad (GDL). Se presenta la demostración de estabilidad del modelo de orden fraccional mediante el segundo método de Lyapunov. Se considera un parámetro físico básico, la inercia de masa de los eslabones empleados. Se utiliza el software Freecad para el diseño mecánico. Se simula el modelo dinámico y en el caso de los manipuladores de 2 y 3 GDL se presentan trayectorias en el plano (x, y) y en el espacio (x, y, z) respectivamente. Los modelos se programan en una tarjeta de desarrollo basada en un microcontrolador, la ventaja de la tarjeta de desarrollo se encuentra en sus periféricos de salida debido a que cuenta con dos canales analógicos de salida, y estos se envían

a un osciloscopio, los resultados obtenidos están de acuerdo con los modelos presentados.

En *Obtención y caracterización de capas de elevada dureza sobre fundiciones nodulares, mediante técnicas de difusión termorreactiva* se describen los trabajos llevados a cabo para generar capas, con presencia importante, principalmente, de carburo de niobio de elevada dureza, sobre una fundición nodular (FN) de matriz perlítica, mediante técnicas de difusión termorreactiva (TRD, por sus siglas en inglés). Los procesos se realizaron empleando un baño de bórax a 950 y 1025°C, durante tiempos de 4 y 6 horas. Los sustratos se caracterizaron mediante espectroscopia de emisión atómica, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Las capas depositadas, asimismo, se caracterizaron empleando ensayos de microdureza Vickers, microscopía electrónica de barrido, espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS por sus siglas en inglés) y difracción de rayos X (DRX). Se alcanzan valores de dureza de los recubrimientos del orden de 2600 Vickers con espesores cercanos a 25 µm. El análisis EDS muestra principalmente la presencia de Fe, Nb, y V. El proceso representa una alternativa de menor costo y ambientalmente más amigable que tecnologías como la de CVD y se considera una opción atractiva para dotar, entre otras características, de mayor resistencia al desgaste a la fundición nodular.

El *Resistencia a la compresión de la laja tipo salmón procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México* tiene como propósito determinar la resistencia a la compresión de la laja tipo Salmón procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México. Para lograr esto, se desarrollaron ensayos de compresión uniaxial siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C170/C170M-16 Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. La empresa Mármoles Gómez cortó 24 probetas cúbicas de esta piedra con dimensión de 50±0.5 mm en cada lado. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ciencias e Investigación en Materiales (LACIIM) del Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol del Estado de Puebla (CECOTIMEP) perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez (ITSTR) del Tecnológico Nacional de México (TecNM). 12 probetas fueron secadas en horno a temperatura de 60°C durante 48 horas obteniendo peso seco constante; otras 12 probetas fueron saturadas en agua destilada a temperatura ambiente durante 48 horas obteniendo peso saturado constante. Se realizaron ensayos de compresión uniaxial en: 6 probetas secas con carga paralela a la veta, 6 probetas secas con carga perpendicular a la veta, 6 probetas saturadas con carga paralela a la veta y 6 probetas saturadas con carga perpendicular a la veta. La velocidad del ensayo de compresión uniaxial fue de 0.5 MPa/s. Los resultados muestran que la laja tipo Salmón tiene una resistencia a la compresión promedio de 56.35 MPa. En conclusión, la laja tipo *salmón* de esta localidad es recomendada para usos como columnas para mesas, patas para sillas y pedestales para lavabos en casa-habitación.

Se presenta en el último trabajo el análisis numérico transitorio del flujo generado por la inyección de aire en un cilindro horizontal que contiene agua y que su parte superior está abierta a la atmósfera. El aire es introducido al depósito por medio de tres toberas y frente a ellas se colocan dos tipos de deflector; con sección transversal circular y triangular. El modelo matemático contempla las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas para un fluido newtoniano, viscoso, en dos fases, en régimen turbulento y en estado transitorio; y se resuelve con el método numérico del elemento finito. Los resultados muestran los campos de velocidad transitorios en la sección transversal del recipiente que coincide con el centro de las toberas que inyectan el aire al contenedor. También se analiza el comportamiento de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del cilindro para diferentes tiempos y para la posición axial antes mencionada. Al comparar el campo de velocidades en estado permanente del sistema con deflectores triangulares contra el circular se encontró que: a) el valor del vector velocidad en la parte superior izquierda del tanque disminuyó 3.20%; b) el valor máximo positivo promedio de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del depósito disminuyó 3.71%.

Finalmente, se les invita a consultar los artículos y números completos en línea en su página electrónica www.cientifica.esimez.ipn.mx.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a01

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 83-96, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Análisis y modelo para la asignación del despacho y el costo de potencia reactiva de generación de la GCROR*

Oscar **Fernández-Galindo**[2]
José Luis **Mar-Villegas**[1,2]
Juan Carlos **Escamilla-Sánchez**[1]
Genaro **Campos-Castillo**[1]
Ismael **Albino-Padilla**[1]

[1]Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ingeniería
Blvd. Valsequillo y A. San Claudio S/N, Edf. ING,
Col. San Manuel, Ciudad Universitaria, Puebla, Pue. CP 72570.
MÉXICO
[2]Comisión Federal de Electricidad
Zona de Operación de Transmisión Puebla-Tlaxcala de CFE
km 4.5, Antigua, Carretera a la Resurrección S/N,
Col. Bosques de Manzanilla, Puebla, Puebla, CP 72307.
MÉXICO

correos electrónicos (emails):
oscarferunam@hotmail.com, marville241101@hotmail.com
gccampos2000@yahoo.com.mx, conver_ie_ipn@hotmail.com
escamilla_14@hotmail.com

Recibido 31-01-2020, aceptado 26-03-2020.

Resumen

Desde el año 2013, México liberó su sector energético y con ello incursiona en el modelo de Mercado Eléctrico Mayorista (MEM). En este contexto, los servicios en red que son necesarios para realizar el servicio de transmisión de energía llamados servicios auxiliares, tales como la potencia reactiva de generación, la cual debido a su particularidad de tener un efecto local entran en la polémica de ¿cómo deben administrarse?, ¿quién debe dar el servicio? y ¿cuánto debe pagarse por el servicio?, estas son algunas controversias que surgen al liberar un sector eléctrico. Este artículo de investigación propone utilizar un método estocástico denominado Optimización de Enjambre de Partículas (OEP) que se aplica en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) con el propósito de obtener un despacho de potencia reactiva eficiente que dé seguridad y confiabilidad al SEP, una vez determinado este escenario se puede aplicar la metodología propuesta para obtener el costo de potencia reactiva para cada generador. El método OEP puede obtener una solución rápida teniendo como consigna tener un despacho de potencia reactiva eficiente respetando bandas de voltaje en buses con el mínimo de pérdidas eléctricas, usando la red eléctrica del Operador Independiente de Sistema CENACE, en un nivel de voltaje de 400 kV. Las principales conclusiones de esta investigación: la administración eficiente de potencia reactiva usando OEP, reduce las pérdidas eléctricas al mínimo, las constantes C_1 y C_2 son importantes para obtener mejores resultados en la optimización y el método propuesto es una herramienta práctica para usar en tiempo real, debido a que la potencia reactiva suministrada tiene un impacto local que está dentro del ámbito de acción del operador de sistema.

Palabras clave: potencia reactiva de generación, mercado eléctrico mayorista, servicios auxiliares, optimización de enjambre de partículas, operador Independiente de sistema y costo de generación.

Abstract

(Model to Determine the Dispatch and Cost of Reactive Power Generation of the GCROR in a Released Electricity Market)

Since 2013, Mexico has liberated its energy sector and thereby ventures into the Wholesale Electricity Market (MEM) model. In this context, the network services that are necessary to perform the energy transmission service called auxiliary services, such as the reactive power of generation due to its particularity of having a local effect, enter into the controversy of: how they should be managed? Who should give the service? And how much should be paid for the service? These are some controversies that arise when liberating an electricity sector. This paper proposes to use a stochastic method called Particle Swarm Optimization (PSO) that is applied in an Electric Power System (EPS) in order to obtain an efficient reactive power dispatch that gives security and reliability to the EPS, once this scenario is determined, the methodology proposed can be applied to obtain the cost of reactive power for each generator. The PSO method can obtain a quick solution based on having an efficient reactive power dispatch respecting voltage bands on buses with the minimum electrical losses, using the CENACE System Independent Operator's electrical network, at a voltage level of 400 kV. The main conclusions of this research are: the efficient administration of reactive power using EPO, reduces electrical losses to a minimum, constants C_1 and C_2 are important to obtain better results in optimization and the proposed method is a practical tool to use in time real, because the reactive power supplied has a local impact that is within the scope of the system operator.

Index terms: reactive power generation, wholesale electricity market, auxiliary services, particle swarm optimization, independent system operator and generation cost.

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

1. Introducción

En 2006, Sedaghati [1] explica que el proceso de la desregulación de la industria eléctrica, desarrollado durante más de quince años, es aquel en la que se desvinculan diferentes actividades relacionadas con la generación de energía eléctrica y el consumo de la misma, para obtener un precio competitivo de la electricidad. En 2001, Bhattacharya [2] explica que el tema de los costos de potencia reactiva es considerado como un servicio auxiliar o servicio conexo. Dicha potencia reactiva contribuye al servicio de control de voltaje manteniéndolo, en la medida de lo posible, en límites aceptables de operación.

En 2013, el presidente de la República Mexicana Enrique Peña Nieto [3] emite el Decreto por la que se reforman y adicionan diversas disposiciones en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, y le da las atribuciones del control y la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) al Centro Nacional de Control de Energía (CENACE) perteneciente a la Comisión Reguladora de Energía (CRE). En 2014, La Ley de la Industria Eléctrica [4] define un servicio conexo como, los servicios vinculados a la operación del SEN y que son necesarios para garantizar su "Calidad", "Confiabilidad", "Continuidad" y "Seguridad". La Formulación Matemática del Modelo de Asignación de Unidades con Restricciones de Seguridad y Cálculo de Precios Marginales Locales y de Servicios Conexos en el Mercado de un Día en Adelanto [5] de 2016, no indica, de forma clara, cómo calcular el precio de la potencia reactiva para las necesidades del SEN [23, 24].

México cuenta con diferentes tipos de centrales eléctricas. La tabla 1 muestra las diferentes tecnologías para la generación eléctrica de 2016, donde principalmente predomina la generación hidráulica, termoeléctrica y ciclo combinado. Sin embargo, la generación eólica ha tenido un gran repunte por las diferentes inversiones que han tenido las empresas privadas. Respecto a la generación fotovoltaica, el crecimiento ha sido lento y depende de las facilidades en la legislación actual. Un punto importante para considerar es el aumento en las inversiones en gasoductos que provocarán un repunte en la generación térmica. Demás información detallada puede encontrarla en la tabla 1. La figura 1 presenta las principales centrales eléctricas del Sistema Eléctrico Mexicano divididas por gerencias de control regional [6]. En la Gerencia de Control Regional Central cuenta con generación hidráulica, ciclo combinado, turbogás, vapor y combinación interna.

Tabla 1. Capacidad instalada y generación bruta de México 2016 [http://egob2.energia.gob.mx/portal/electricidad.html].

	Capacidad instalada		Generación bruta	
Tecnología de Generación / Combustible	Mega Watt (MW)	%	Giga Watt – Hora (GWh)	%
Hidroeléctrica	12,092	21.763	29,138	11.063
Termoeléctrica	14,388	25.894	45,031	17.097
Ciclo Combinado CFE	8,179	14.720	49,541	18.809
Ciclo Combinado PEE	12,340	22.208	86,400	32.803
Duales	0	0	17,819	6.765
Carboeléctrica	5,378	9.680	16,389	6.222
Nucleoeléctrica	1,608	2.894	10,567	4.012
Geotermoeléctrica	874	1.572	6,033	2.290
Eoloeléctrica CFE	86	0.155	187	0.071
Eoloeléctrica PEE	613	1.103	2,275	0.864
Fotovoltaica	6	0.011	12.3	0.005
Total	**55,564**	**100**	**263,393**	**100**

Como se puede observar, México cuenta con una variedad de tipos de centrales eléctricas, públicas y privadas, que pueden contribuir a la aportación de la potencia reactiva necesaria para el soporte de voltaje. En 1999, Lamont y Fu [7] explican que el propósito principal del despacho de la potencia reactiva de generación es mantener el perfil de voltaje en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), dentro de los límites de calidad establecidos. Cabe mencionar que la potencia reactiva tiene un efecto local, es decir, la aportación o absorción de potencia reactiva de un generador sólo se manifestará dentro de una región limitada. En México, el despacho de potencia reactiva se realiza en tiempo real y está a cargo del operador de sistema del CENACE quien solicita la aportación o absorción de potencia reactiva a cada generador basándose en su conocimiento de la red a través de muchos años de experiencia de operarla. Sin embargo, como ya se ha mencionado, el efecto local que tiene la potencia reactiva puede obtenerse con muchas combinaciones de despacho de potencia reactiva de varios generadores que tienen influencia en cierta zona específica. Esta particularidad de la potencia reactiva y el despacho de la misma a través de la experiencia de un ser humano en algún momento podría volverse tendencioso debido al posible impacto que tenga cierto generador por su capacidad o por su ubicación. Esta tendencia resultaría injusta debido a que, si cierto generador se utiliza de forma recurrente para satisfacer las necesidades de voltaje de una zona, este generador estaría limitado para poder aumentar su aportación de potencia activa y, en consecuencia, sus ganancias económicas, además de que el resto de los generadores que se encuentren en esa zona no estarían apoyando en mantener las condiciones necesarias de operación de la red.

El propósito del presente estudio de caso es, diseñar un modelo para analizar y asignar el despacho de potencia reactiva de generación de un SEP en un mercado eléctrico competitivo de forma eficiente y poste-

Fig. 1. 1 Principales Plantas del Sistema Eléctrico Mexicano, tomado de: http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/6597-cenace-energia-potencia-electrica

riormente asignar el costo del servicio de potencia reactiva brindado por cada generador. En un SEP el despacho de potencia activa se realiza con un día de anticipación, basándonos en esta condición, también es posible realizar un despacho de potencia reactiva con un día de anticipación utilizando OEP. Un modelo para asignar el despacho de potencia reactiva mediante OEP contribuirá a la operación del sistema en tiempo real conociendo la cantidad de reactivos que debe aportar cada generador sincronizado al sistema de tal forma que los voltajes se encuentren dentro de la banda de voltaje permitida con el mínimo pérdidas eléctricas. En 2007, Grainger [8] define la potencia reactiva como la energía que viaja al doble de la frecuencia desde la fuente hacia la carga y viceversa. El promedio de dicha energía es cero y es utilizada por aquellos elementos eléctricos, tales como motores, transformadores, entre otros, para sus propios requerimientos. Dicha energía se denota por la letra *Q*. En 2002, Tovar *et al*. [9] explica que la asignación de costo de la potencia reactiva es el cálculo objetivo y justo que el proveedor de servicios auxiliares cobrará por concepto de potencia reactiva. Por lo anterior, surgen las siguientes preguntas de investigación:

¿Qué se entiende por costo de potencia reactiva?
¿Qué y cómo reducir la incertidumbre para el cálculo del costo de potencia reactiva?
¿Cómo beneficiará a México y a los proveedores o al operador independiente del sistema contar con un modelo para el cálculo de costo de potencia reactiva?

Así, el objetivo general de esta investigación es analizar y proponer un modelo estocástico para asignar el costo de potencia reactiva de generación dentro de un mercado eléctrico competitivo. Respecto a la delimitación del proyecto de investigación será realizada con la red perteneciente a la GCROR, descrita por Luna [10]. La presente investigación se justifica debido a que México ha iniciado en enero del 2016, con el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) y una propuesta de modelo para determinar el costo de la potencia reactiva de generación, que contribuirá a entender el comportamiento de dicho costo. Para realizar el proyecto de investigación, se cuenta con los recursos y conocimientos para llevarlo a cabo.

2. Desarrollo

En 2013, Farzaneh *et al*. [11] explica que el control de voltaje y el flujo de potencia es una de las características importantes para la operación de un SEP, particularmente en aquellos SEP grandes, donde tienen un gran número de elementos conectados para asegurar la calidad y la confiabilidad del suministro eléctrico, así como también la reducción de las

pérdidas eléctricas. Lo anterior, para mantener un perfil de voltaje dentro de los límites establecidos (±5% Vnom) y permitir un incremento de transferencia de potencia aparente. Además, permite tener un margen de estabilidad amplio ante contingencias que se presenten en el SEP y un despacho óptimo de generación.

En 2012, Farzaneh *et al*. [11] y, en 2011, CFE [12] explican que existe una fuerte dependencia entre la potencia activa (P) y el ángulo de voltaje (δ) por un lado, y la potencia reactiva (Q) y la magnitud de voltaje (V) por otro lado. Las máquinas síncronas pueden generar o absorber potencia reactiva cuando el devanado del rotor es sobre-excitado o sub-excitado según corresponda. De la teoría de máquinas, una máquina síncrona puede ser modelada con su voltaje interno síncrono E en serie con la impedancia síncrona Z_d. Despreciando la resistencia de los devanados de la máquina, la impedancia síncrona puede ser reemplazada por la reactancia síncrona X_d. En 1999, Lamont y Fu [7] analizan el costo de la potencia reactiva que es suministrado por la generación. Así mismo, explican que el costo de la potencia reactiva tiene dos componentes: los costos explícitos y los costos implícitos. Los costos explícitos son pagados directamente, tal es el caso de los costos de capital de las instalaciones y el costo de operación de producción. Los costos implícitos son, principalmente, los costos de oportunidad de suministrar un monto de potencia reactiva. Estos autores, proponen un modelo para determinar el costo de la potencia reactiva despachada al minimizar las pérdidas. En 2002, Tovar *et al*. [9] proponen una metodología para asignar el costo de potencia reactiva a través de sensibilidades relativas por nodo.

En 2008, Junfang *et al*. [13] utilizan el costo de producción como función objetivo del modelo del flujos óptimos de potencia, para calcular el precio marginal de la potencia reactiva en tiempo real. En 2012, Kate y Khatri [14] utilizan la optimización de enjambre de partículas y la formulación de flujos de potencia, para calcular el costo de la potencia reactiva. En 1995, Eberhart y Kennedy [15] propusieron una técnica estocástica de optimización llamada: Optimización de Enjambre de Partículas o *Particle Swarm Optimization* (PSO). A través de los años, el PSO se ha aplicado en diferentes áreas del conocimiento obteniendo mejores resultados. Dicha técnica se basa en el comportamiento de las aves migratorias (parvadas) o cardúmenes de peces. La figura 2 muestra que la técnica comienza con una población aleatoria de soluciones o partículas, y busca la solución óptima llamada partícula óptima. Cada partícula realiza un seguimiento de sus coordenadas que están asociadas con la mejor solución que ha logrado hasta el momento. A la solución o partícula óptima se le llama *pbest* y a la localización se le llama *lbest*. Otro término es el *gbest*, que es la mejor partícula óptima global. El concepto de optimización de enjambre de partículas es en cada valor de tiempo t y la velocidad de cada partícula hacia las ubicaciones de *pbest* y *lbest*. La aceleración es ponderada a través de un número aleatorio que trata de alcanzar *pbest* y *lbest*.

En 2014, Bla [16] presenta una variante del PSO aplicado a un SEP, el cual se presenta en (1).

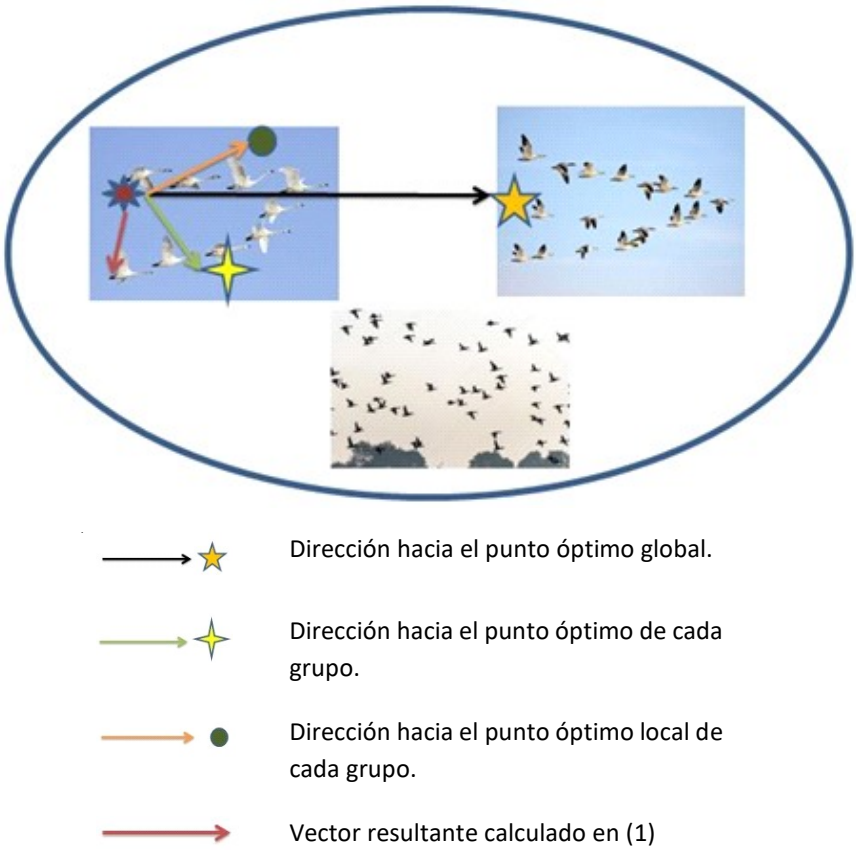


Fig. 2. Procedimiento de búsqueda para el algoritmo de optimización de enjambre de partículas.

$$V_{ik}^{t+1} = k * \left[\omega * V_{ik}^{t} + C_1 * rand_{1,k} * \left(p_{best,ik} - X_{ik}^{t}\right) + C_2 * rand_{2,k} * \left(g_{best,k} - X_{ik}^{t}\right)\right] \quad (1)$$

donde

$V_{ik}^{(t+1)}$ es la velocidad de las partículas siguiente *i* en el índice o dimensión *k* actualizada de la iteración *t* + 1.

k es factor de constricción entre C_1 y C_2.

ω es el peso inercial calculado entre el máximo y mínimo.

V_{ik}^{t} es la velocidad de la partícula *i* en el índice o dimensión *k* de la iteración *t*.

C_1 es el factor de aprendizaje uno.

$rand_{(1,k)}$ es el primer número aleatorio dentro del rango [0,1] en el índice o dimensión *k*.

$p_{(best,ik)}$ es la mejor posición de la partícula *i* en el índice *k*.

X_{ik}^{t} es la posición de la partícula *i* en el índice o dimensión *k* de la iteración *t*.

C_2 es el factor de aprendizaje dos.

$rand_{(2,k)}$ es el segundo número aleatorio dentro del rango [0,1] en el índice o dimensión *k*.

$g_{best,k}$ es la mejor posición encontrada por todas las partículas del grupo (mejor posición global) en el índice o dimensión *k*.

Bla [16] explica que cada partícula representa una solución al problema de optimización y su ubicación en el espacio de soluciones, que se determina mediante la posición, la cual representa el valor que toman las variables de decisión del problema. Cada partícula se traslada a una nueva posición de acuerdo con su velocidad, que es influenciada por la mejor posición (p_{best}) encontrada por esta partícula y por la mejor posición (el líder del grupo g_{best}) de todas las partículas del grupo. El operador $p_{(best,ik)}$ representa el desempeño de cada partícula o que tan cerca se encuentra de la mejor posición global g_{best}, y se mide utilizando la función objetivo de la cual depende el éxito y el desempeño del algoritmo ya que se construye según a lo que se busque en el problema a resolver. Finalmente, el g_{best} representa el comportamiento del grupo y almacena la mejor posición global (posición del líder) actual en el grupo. Bla [16] expone que cada partícula *i*, es representada por su posición y velocidad en cada instante o iteración *t*, la cual es representada en (2):

$$\left[X_{i(t)}, V_{i(t)}\right] \quad (2)$$

Bla [16] explica que la partícula *i*, pertenece a un conjunto de partículas o población de individuos ubicados de forma aleatoria de tamaño *p*, donde *i* = 1, 2, 3,…, *p*. Cada posición $X_{i(t)}$ representa las soluciones potenciales al problema de optimización. Para un sistema cuyas soluciones son de dimensión *n*, cada partícula es tratada como un vector de la misma dimensión y la posición de la partícula *i* es representada en (3) por:

$$X(i) = \left[x_{(i,1)}, x_{(i,2)}, \dots, x_{(i,n)}\right] \quad (3)$$

Posteriormente, la partícula *i*, se desplaza a una nueva posición a una velocidad en almacenada en un vector dado en (4) por:

$$V(i) = \left[v_{(i,1)}, v_{(i,2)}, \dots, v_{(i,n)}\right] \quad (4)$$

La mejor posición de la partícula *i*, es determinada de acuerdo con el valor de su función objetivo y representada en (5) por:

$$p_{best,i} = \left[p_{best,i1}, p_{best,i2}, \dots, p_{best,in}\right] \quad (5)$$

Así mismo, la mejor posición encontrada por todas las partículas del grupo (mejor posición global) se muestra en (6) por:

$$g_{best,i} = \left[gp_{best,i1}, g_{best,i2}, \dots, g_{best,in}\right] \quad (6)$$

El peso inercial se calcula de acuerdo con 7

$$\omega = \omega_{max} - \frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{T} t \quad (7)$$

donde

$\omega_{máx}$, $\omega_{mín}$ son los pesos máximos y mínimos respectivamente y que están dentro del rango de [0.4,0.9], que representan términos heurísticos que logran un buen balance entre la exploración local y global.

T es el número total de iteraciones.

t es el número de iteración.

Con la finalidad de eliminar la tendencia que favorezca ya sea las búsquedas globales o locales, se hace un uso del factor llamado "factor de constricción", tal y como se muestra en (8).

$$k = \frac{2}{\left|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}\right|} \quad (8)$$

donde: φ es la suma de $C_1 + C_2$.

En 2002, Clerc [17] explica que mediante los factores de aprendizaje C_1 y C_2, es posible favorecer la mejor posición global; sin embargo, por practicidad suele darles el mismo valor a ambos. Aunque estudios sobre los factores de aprendizaje se encontró que, teniendo un φ < 4, el enjambre tiene una trayectoria en espiral, que avanza lentamente hacia alrededor de la mejor solución sin tener garantía de su convergencia. Con un φ > 4, se asegura una convergencia rápida. Tomando φ = 4.1, o sea $C_1 = C_2 = 2.05$, se tiene un valor de constricción *k* 0.72984. Estas consideraciones resultan en el comportamiento del enjambre que eventualmente se limita a un área pequeña del es-

pacio de búsqueda factible que contiene la mejor solución conocida. En 2010, Sedighizadeh *et al.* [18] explica en (9), que la función de costo de producción de un generador eléctrico en función de la potencia activa y reactiva. Considerando una red eléctrica de N buses o barras y N_g generadores.

$$C = \sum_{i \in N_g} \left[C_{gpi}(P_{Gi}) + C_{gqi}(Q_{Gi}) \right] \tag{9}$$

Sujeta a las siguientes restricciones de igualdad o desigualdad:

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j \in N} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \tag{10}$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j \in N} |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \tag{11}$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i \in N_G \tag{12}$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i \in N_G \tag{13}$$

$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \quad i \neq j \; i,j \in N \tag{14}$$

$$V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max} \tag{15}$$

donde

P_{Gi},Q_{Gi} es la potencia activa y reactiva del generador eléctrico en el bus i.

P_{Di},Q_{Di} es la potencia activa y reactiva demandada en el bus i.

$C_{gpi}(P_{Gi})$ es la función de costo de la potencia activa en el bus i. Considerando $C_{gpi}(P_{Gi}) = \alpha P_{Gi}^2 + bP + C$, que es la curva de costo del generador eléctrico.

$C_{gqi}(Q_{Gi})$ es la función de costo de la potencia reactiva en el bus i.

La función de costo de potencia reactiva de generación está basada en el costo de oportunidad deducido a través de la curva de capacidad del generador, tal y como se muestra en la figura 3. Esencialmente el costo de oportunidad está basado en los procesos de la oferta y la demanda, pero es difícil determinar su valor exacto. En este documento de investigación se utilizará una forma simple de calcular el costo de la potencia reactiva de generación, en (16) se presenta cómo hacerlo.

$$C_{gqi}(Q_{Gi}) = \left[C_{gpi}(Q_{Gi,max}) - C_{gpi}\left(\sqrt{S_{Gi,max}^2 - Q_{Gi}^2} \right) \right] K \tag{16}$$

donde

Q_{Gi} es la potencia reactiva del generador en el bus i.

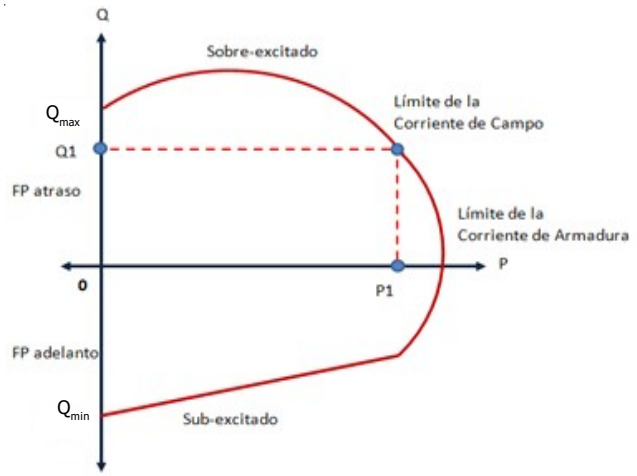


Fig. 3. Curva de capacidad de un generador eléctrico

$S_{(Gi,max)}$ la máxima potencia aparente del generador en el bus i.

K es una constante porcentual de eficiencia de potencia reactiva, el cual se encuentra entre los valores de 5% [10].

2.1. Método

En esta investigación se utilizó el método cualitativo, con un tipo de investigación de estudio de caso, que sirve para estudiar a profundidad una población o muestra en particular. En esta sección se propone un modelo mediante un algoritmo para calcular el costo de potencia reactiva de generación, tomando el método de enjambre de partículas propuesto en 2018 por Fernández [19]. El método se implementó en el lenguaje de programación MATLAB® [20] y [21], a través de scripts con el propósito de analizar el costo de potencia reactiva de generación. Para la obtención del comportamiento en el caso de estudio, se requirió de estudios de flujos de potencia convencional y de ahí utilizarlo para aplicar el método de enjambre de partículas. El alcance de esta investigación es del tipo descriptivo, ya que con las simulaciones se obtendrá información de la potencia reactiva de la GCROR. Como una consecuencia de la solución de los flujos de potencia, se obtendrán las pérdidas eléctricas del SEP bajo prueba. Además, con la aplicación del modelo propuesto se explicará el comportamiento del costo de la potencia reactiva. Finalmente, es una investigación experimental, debido a que con la manipulación de las variables se obtendrá información relacionada a las pérdidas eléctricas en diferentes condiciones de operación y el costo de la potencia reactiva despachada. Para la obtención de los datos, se utilizará el programa MATLAB® donde se modelará la red de 400kV de la GCROR, misma que se encuentra descrita por Luna [10], y se programará el modelo propuesto para determinar el costo de genera-

ción de potencia reactiva. Los vaciados de flujos serán comparados con flujos de potencia del programa PSS®E mismo que servirá como validación de los flujos de potencia, tanto activo como reactivo y del fasor de voltaje. Las variables son el costo de generación de potencia reactiva como variable dependiente, y la mejor potencia reactiva despachada por los generadores eléctricos como variable independiente. A continuación, se describe el caso base de la red de 400kV de la GCROR. Debido a que en la simulación se requiere de información de la red en un instante determinado, con información del 2014, se toma un flujo de potencia activa del sureste al centro del país de 3078.5MW, con una demanda en la GCROR de 7816.6MW, con un flujo de potencia activa desde la GCROR hacia zona peninsular del país de 517.8MW, considerando un flujo de potencia activa en el enlace internacional de México-Centroamérica de 127.3MW, con una generación de 7677.3MW, tomando una carga industrial en un nivel de voltaje de 400kV de 100.8MW, tomando límites de control de voltaje desde 402.2kV hasta 419.2kV y tomando en cuenta que, para los nodos de CZM, IPO y TYS [22] los límites de control de voltaje son desde 403.8kV hasta 420.2kV.

La tabla 2 presenta las fuentes de potencia reactiva de generación que se encuentran en el ámbito de la GCROR. Destaca el hecho que, trece de los diez y siete nodos cuentan con reactores para el control del perfil de voltaje cuando la demanda es mínima, demás información la puede consultar en la tabla. La tabla 3 muestra las líneas de transmisión que cuentan con capacitores serie, observe que uno de capacitores serie se encuentra desconectado (TCL A3T40 YTP) por estar en mantenimiento preventivo.

La tabla 4 presenta los datos necesarios de potencia activa y reactiva de generación, así como también para los condensadores síncronos. En los nodos de EDO-400 y TMD-400 son condensadores síncronos y los restantes son generadores eléctricos. Demás información puede consultarla en la tabla. La figura 4 presenta el caso base en el programa PSS®E, en la imagen todos los capacitores serie se encuentran desconectados para poder compararlos con los resultados en MATLAB®; sin embargo, para realizar la simulación se sumó la reactancia capacitiva con la de la línea de transmisión.

La tabla 5 presenta información de los fasores de voltaje en cada uno de los nodos que representan el caso de estudio. Resaltan dos subestaciones que se encuentran con un perfil de voltaje bajo, los cuales son: LAV con 0.995 p.u. (398kV) y MFA con 0.993 p.u. (397.2kV).

La figura 5 presenta el diagrama de flujo que representa el modelo PSO aplicado a la red de 400kV de la GCROR, mayor detalle sobre el diagrama de flujo puede consultarlo en [19]. El modelo comienza cargando el caso base de la red de la GCROR, realiza una simulación de flujos de potencia, el resultado de resolver flujos de potencia se obtiene la información de las pérdidas eléctricas, del fasor de voltaje, así como la potencia activa y reactiva de cada uno de los elementos eléctricos. Esta información servirá para formar las condiciones

Tabla 2. Líneas de transmisión que cuentan con capacitor serie en la red de 400kV de la GCROR.

	Subestación	Unidades de Generación en Servicio	Condensador Síncrono	Reactores
1	ETS-400	3	-	-
2	FET-400	6	-	-
3	EAT-400	3	-	-
4	CZM-400	-	-	1
5	EDO-400	-	1	2
6	IPO-400	-	1	-
7	JUI-400	-	-	4
8	LAV-400	2	-	2
9	ANG-400	4	-	1
10	MPS-400	5	-	1
11	PBD-400	-	-	2
12	PRD-400	-	-	1
13	TCL-400	-	-	2
14	THP-400	-	-	1
15	TMD-400	-	1	8
16	MMT-400	6	-	4
17	TUV-400	2	-	3

Tabla 3. Líneas de transmisión que cuentan con capacitor serie en la red de 400kV de la GCROR.

	LT que cuentan con CS	Estado
1	JUI A3040 MMT	En servicio
2	JUI A3140 MMT	En servicio
3	JUI A3T90 MMT	En servicio
4	TCL A3U20 EDO	En servicio
5	TCL A3U30 EDO	En servicio
6	TCL A3540 TMD	En servicio
7	TCL A3T40 YTP	Fuera de servicio por mantenimiento
8	TMD A3360 MID	En servicio
9	TMD A3260 CHM	En servicio
10	PBD A3460 TMD	En servicio
11	PBD A3920 OJP	En servicio

Tabla 4. Datos de potencia activa y reactiva de generación y condensadores síncronos para la red de 400kV de la GCROR.

No. Bus	Bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	Pmax	Pmin
1	MMT-400	1560	-85.8	790.002	-880.002	1.01	1800	1450
7	EDO-400	0	54.4	300	-300	1.023	0	0
9	IPO-400	675.1	4.3	300	-300	1.022	676	675
10	JUI-400	96.2	35.9	35.9	36	1.03	95.6	95.4
11	LAV-400	1500	-20.5	850	-560	0.995	1600	800
15	ANG-400	640	5.6	238.8	-314	1.0188	720	640
16	MPS-400	775	-55.8	425	-675	1.02	900	675
25	TMD-400	0	-56.4	300	-300	1.022	0	0
27	TTE-400	1831	-46.9	408	-332	1.03	2000	1400
28	TUV-400	600	15.5	338.38	-290.8	1.0225	700	350
Total =	**-**	**7,677.3**	**-149.7**	**3,986.082**	**-3,915.802**	**-**	**8,491.6**	**6,085.4**

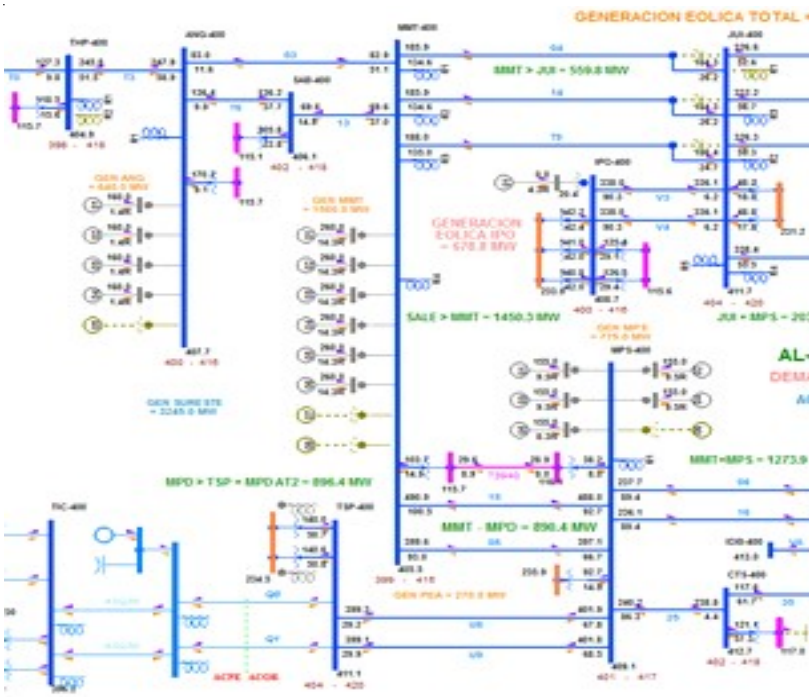


Fig. 4. Caso base del mes de abril de 2014, demanda máxima de la red de 400kV de la GCROR.

iniciales. Posteriormente, son definidas las posiciones de las partículas de forma aleatoria y se corren flujos de potencia para cada partícula guardando a través de un ciclo, las penalizaciones o violaciones de voltaje en los buses. Además, se busca y se guardan las penalizaciones de potencia reactiva de generación. Se determinan las pérdidas eléctricas en cada iteración, y se guardan en un vector. En este punto del proceso son evaluadas todas las soluciones y se elige aquella que tenga las mejores características, esta partícula o solución se denomina *pbest* y *gbest*. Las características de la mejor solución local y global se utilizan como valores de aprendizaje y junto con valores aleatorios se actualiza la velocidad dada por (2). Nuevamente se determinan las nuevas posiciones y la velocidad de cada partícula volviendo a realizar flujos de potencia para cada partícula. Con los nuevos valores se busca y se guarda, a través de un ciclo, las penalizaciones o violaciones de voltaje en los buses. Además, se busca y se guardan las penalizaciones de potencia reactiva de generación. Nuevamente se determinan las pérdidas eléctricas de cada iteración y se guardan en un vector. Finalmente con los valores

Tabla 5. Valores del fasor de voltaje, obtenidos de la simulación de flujos de potencia con MATLAB de la red de 400kV de la GCROR.

		Voltaje		Generación		Carga	
No.	Subestación	Mag [pu]	Ang [pu]	P [MW]	Q [MVAr]	P [MW]	Q [MVAr]
1	TTE	1.03	-0.650*	1731.23	30.21	980.4	-122.4
2	CBE	1.016	-18.651	-	-	-	-
3	CHM	1.029	-7.241	-	-	76	54
4	CTS	1.028	-6.014	-	-	121.1	57.3
5	CYR	1.014	-11.52	-	-	5.8	-9.5
6	CZM	1.013	-11.505	-	-	-	-
7	EDO	1.023	-8.51	0	9.1	73.5	7.8
8	IDB	1.029	-6.14	-	-	15	5
9	IPO	1.017	3.406	675.1	4.3	0	184.9
10	JUI	1.025	-1.847	96.2	35.9	-	-
11	LAV	0.995	-2.328	1500	-291.3	195.6	4.9
12	LRP	1.01	-14.166	-	-	323	11.9
13	MFA	0.993	-5.349	-	-	521.8	24.6
14	MID	1.029	-6.129	-	-	195.6	48.4
15	ANG	1.019	3.856	640	2.22	170.2	-9.1
16	MPS	1.02	-1.47	775	-68.88	130.9	-6.9
17	MPT	1.005	-15.07	-	-	220.8	63.7
18	OJP	1.014	-13.4	-	-	116.7	74.7
19	PBD	1.011	-13.758	-	-	377.4	13.6
20	PPT	1.024	-3.269	-	-	179.2	11.6
21	PRD	1.026	-3.037	-	-	192.5	-38.1
22	SAB	1.013	2.563	-	-	205.8	22.8
23	TCL	1.017	-13.129	-	-	329.6	22.1
24	THP	1.012	-2.478	-	-	245.8	-25.4
25	TMD	1.022	-8.861	0	20.92	156.8	-26.6
26	TSP	1.025	-6.863	-	-	798.4	-59.1
27	MMT	1.01	2.869	1560	-237.46	103.7	14.9
28	TUV	1.023	-6.416	600	-35.87	1021.1	-269.2
29	TYS	1.014	-13.42	-	-	80	7.9
30	**YTP**	**1.015**	**-18.648**	**-**	**-**	**664.7**	**33.8**
			Total:	**7577.53**	**-530.87**	**7501.4**	**97.6**

encontrados de mejor posición y velocidad, se procede a calcular el costo de generación de acuerdo con (16). A continuación, se presentan los resultados a través de tablas y figuras, así como la explicación de las mismas.

La tabla 6 presenta el vaciado de flujos de potencia utilizando el método de PSO, observe que los perfiles de voltajes en cada uno de los nodos están dentro de sus rangos. De igual forma, la potencia reactiva de generación está dentro de los límites

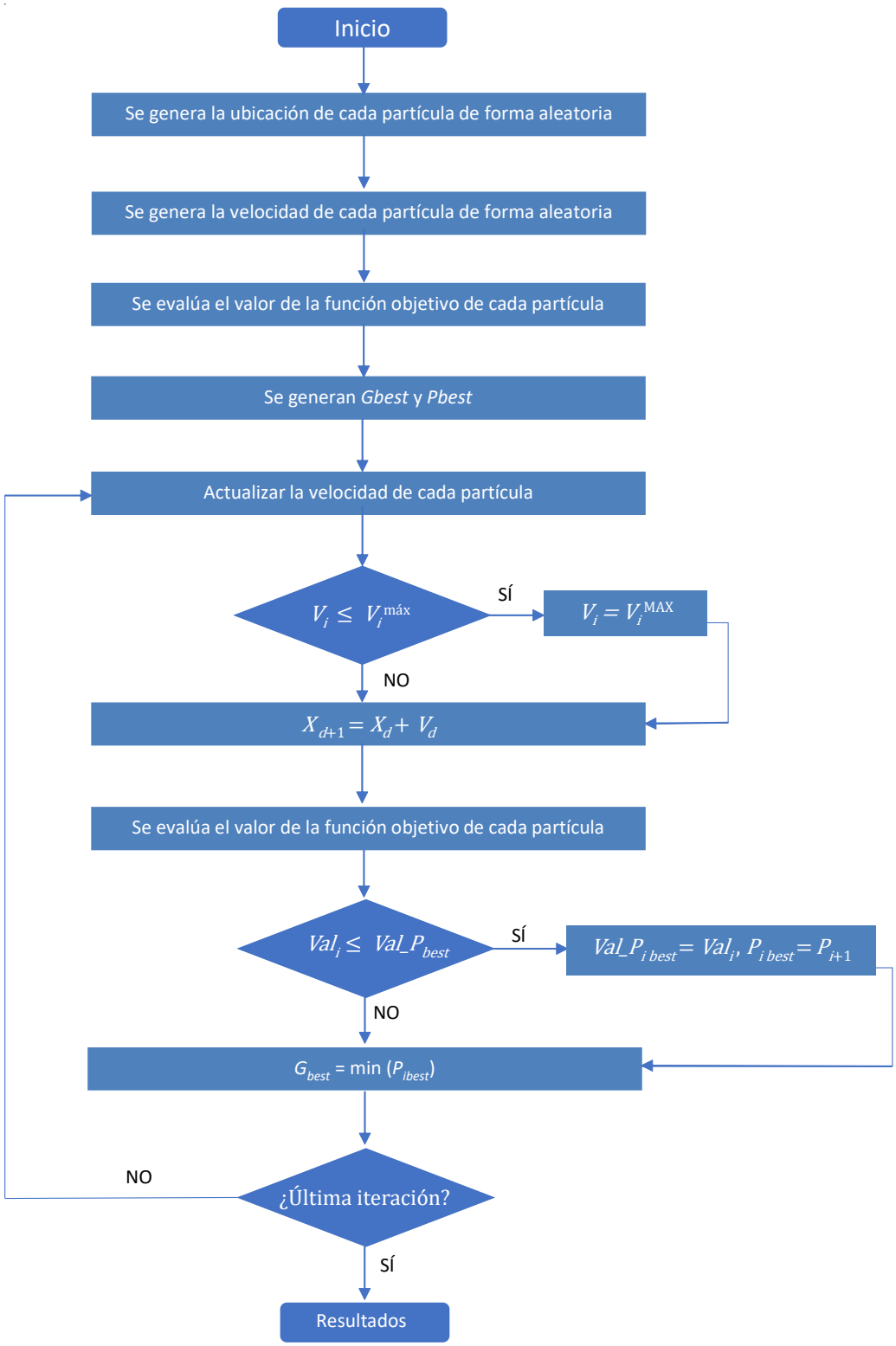


Fig. 5. Modelo PSO aplicado a la red de 400kV de la GCROR [19].

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 83-96, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a01

Tabla 6. Resultado de aplicar el PSO a la red de 400kV de la GCROR.

		Voltaje		Generación			Carga	
No.	Subestación	Mag (pu)	Mag (KV)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr
1	TTE	1.027	410.8	-0.650*	1727.82	-42.9	980.4	-122.4
2	CBE	1.036	414.4	-17.855	-	-	-	-
3	CHM	1.042	416.8	-6.804	-	-	76	54
4	CTS	1.041	416.4	-5.614	-	-	121.1	57.3
5	CYR	1.037	414.8	-11.021	-	-	5.8	-9.5
6	CZM	1.036	414.4	-11.006	-	-	-	-
7	EDO	1.037	414.8	-8.029	0	-32.85	73.5	7.8
8	IDB	1.041	416.4	-5.736	-	-	15	5
9	IPO	1.038	415.2	3.452	675.1	4.3	0	184.9
10	JUI	1.045	418	-1.59	96.2	35.9	-	-
11	LAV	1.033	413.2	-2.465	1500	-141.11	195.6	4.9
12	LRP	1.03	412	-13.548	-	-	323	11.9
13	MFA	1.032	412.8	-5.269	-	-	521.8	24.6
14	MID	1.041	416.4	-5.726	-	-	195.6	48.4
15	ANG	1.029	411.6	3.935	640	-152.24	170.2	-9.1
16	MPS	1.031	412.4	-1.188	775	-283.45	130.9	-6.9
17	MPT	1.025	410	-14.416	-	-	220.8	63.7
18	OJP	1.033	413.2	-12.787	-	-	116.7	74.7
19	PBD	1.031	412.4	-13.155	-	-	377.4	13.6
20	PPT	1.029	411.6	-3.283	-	-	179.2	11.6
21	PRD	1.027	410.8	-3.043	-	-	192.5	-38.1
22	SAB	1.035	414	2.633	-	-	205.8	22.8
23	TCL	1.037	414.8	-12.545	-	-	329.6	22.1
24	THP	1.022	408.8	-2.273	-	-	245.8	-25.4
25	TMD	1.035	414	-8.368	0	-113.75	156.8	-26.6
26	TSP	1.036	414.4	-6.462	-	-	798.4	-59.1
27	MMT	1.037	414.8	2.904	1560	155.09	103.7	14.9
28	TUV	1.018	407.2	-6.41	600	-73.81	1021.1	-269.2
29	TYS	1.033	413.2	-12.806	-	-	80	7.9
30	YTP	1.036	414.4	-17.853	-	-	664.7	33.8
				Total:	**7574.12**	**-644.82**	**7501.4**	**97.6**

de operación de acuerdo con la curva de capacidad de cada uno de ellos. La figura 6 presenta el comportamiento del perfil de voltaje global en los nodos que participan aplicando el método PSO. Como era de esperarse, para mantener el perfil de voltaje dentro de las bandas permitidas y poder reducir las pérdidas eléctricas, se requiere un aumento de la potencia reactiva cercana donde se requiere. En un mercado eléctrico competitivo, es económicamente más redituable reducir las pérdidas eléctricas que la potencia reactiva de generación.

La figura 7 presenta el comportamiento del perfil de voltaje global en cada uno de los nodos que participan en la optimización. Observe que, las subestaciones LAV, ANG, MPS, TMD y MMT fue necesario el suministro de potencia reactiva

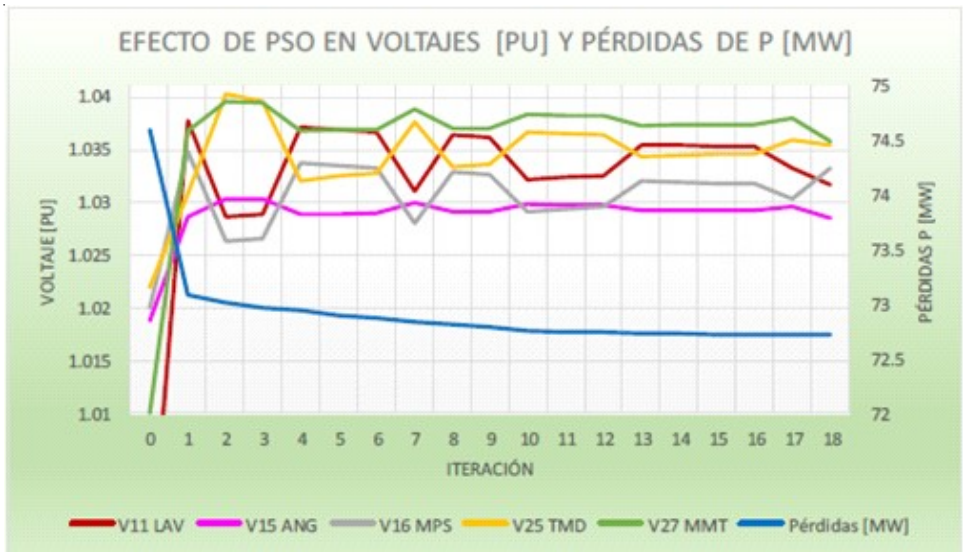


Fig. 6. Comportamiento del perfil de voltaje global en nodos que participan en la optimización.

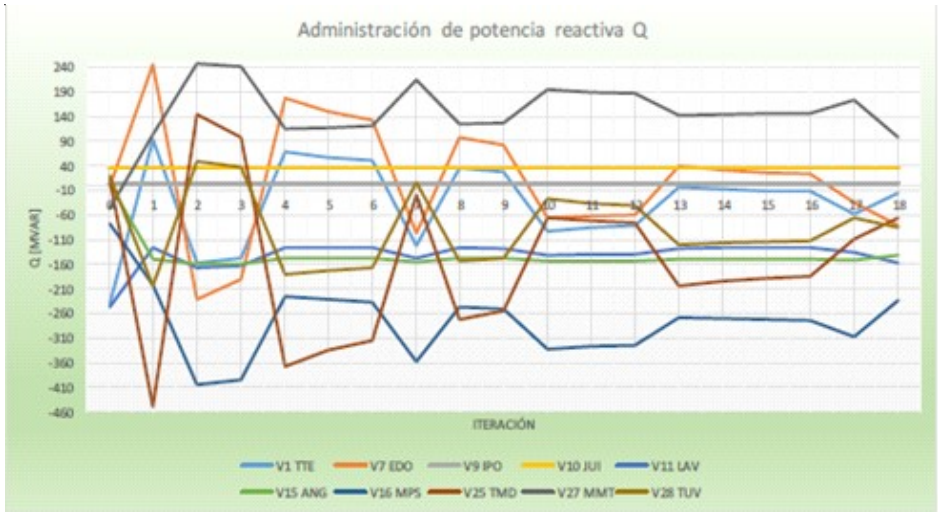


Fig. 7. Comportamiento del perfil de voltaje global en los nodos que participan en la optimización.

de generación. En el caso particular de la subestación TMD el suministro de potencia reactiva es menor comparado con las restantes subestaciones. Lo anterior, es debido a que este nodo se encuentra cerca de aquellos que requieren de potencia reactiva.

La tabla 7 presenta el despacho de potencia reactiva de generación aplicando y sin aplicar el PSO. Aplicando el método de PSO, se observa que: en la subestación LAV pasa de -291.3 a -157.76 MVAr's, ANG pasa de 2.22 a -141.57 MVAr's, MPS pasa de -68.88 a -234.13MVAr's, MMT pasa de -237.46 a 97.62MVAr's, demás información puede consultarla en la tabla.

La tabla 8 presenta el costo de la potencia reactiva de generación en la red de 400kV de la GCROR. Observe que el costo de la potencia reactiva de generación aplicando PSO en la subestación MMT es caro ($38.2273/MVAr) comparado con el de la subestación TUV ($1.4133/MVAr). Pero, cuando no se

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 83-96, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a01

Tabla 7. Despacho de potencia reactiva de generación aplicando PSO y sin aplicar el PSO.

	Sin PSO		Con PSO	
Subestación	Q [MVAr]	V [KV]	Q [MVAr]	V [KV]
V1 TTE	30.21	412	-14.57	413.0
V7 EDO	9.1	409.2	-81.78	414.6
V9 IPO	4.3	406.8	4.30	414.7
V10 JUI	35.9	410	35.90	410.4
V11 LAV	-291.3	398	-157.76	412.7
V15 ANG	2.22	407.6	-141.57	411.7
V16 MPS	-68.88	408	-234.13	413.3
V25 TMD	20.92	408.8	-65.08	414.2
V27 MMT	-237.46	404	97.62	414.3
V28 TUV	-35.87	414.7	-85.79	408.3
Suma	-530.86		-642.86	

Tabla 8. Costo de la potencia reactiva en la red de 400kV de la GCROR, aplicando el PSO y sin aplicar el PSO.

Subestación	Sin PSO [$/MVAr]	Con PSO [$/MVAr]
TTE	0.4471	2.9361
EDO	-	-
IPO	-	-
JUI	-	-
LAV	47.1425	8.7783
ANG	0.0032	21.6152
MPS	2.3863	38.2273
TMD	-	-
MMT	14.3953	5.7967
TUV	0.8279	1.4133
Total	65.2023	78.7669

aplica el PSO en la subestación LAV es más cara ($47.1425/MVAr's) comparado con ANG ($0.0032/MVAr's). Demás información puede consultarla en la tabla.

3. Conclusiones

De acuerdo con lo desarrollado en este artículo de investigación, se obtuvieron las siguientes conclusiones, las cuales se presentan a continuación:

Una de las ventajas que presenta el método de optimización PSO, es que se consiguen soluciones aceptables con poco esfuerzo computacional.

El método de optimización PSO toma en cuenta su posición actual para continuar su exploración en el espacio de búsqueda. Por lo que, aunque sea una exploración aleatoria realiza su búsqueda de manera controlada, tomando en cuenta las mejores soluciones que consiguió anteriormente.

Los factores de aprendizaje C_1 y C_2 son de gran importancia ya que definen el tipo de búsqueda que uno necesita para la solución de su sistema. Se hace notar que estos factores de aprendizaje dependen de la configuración topológica de la red bajo estudio, y depende del comportamiento en cada iteración para ajustarlos. Para esta investigación se utilizaron factores de aprendizaje de $C_1 = 0.01$ y $C_2 = 0.1$ para tener una búsqueda más dispersa.

El modelo propuesto es una herramienta práctica, ya que no es necesario modelar toda la red eléctrica para su funcionamiento. Esto se explica debido a que el impacto que tiene la potencia reactiva, es en forma local, es decir, es posible utilizar equivalentes para tener una red reducida.

Con el desarrollo del presente trabajo de investigación, se obtuvieron las siguientes contribuciones: se desarrolló un modelo que incluye el método PSO que reduce las pérdidas eléctricas realizando varias combinaciones de perfiles de voltaje en nodos con recursos de potencia reactiva y el de costo de la potencia reactiva de generación, se desarrolló una aplicación en el lenguaje de programación MATLAB®, como herramienta de aplicación general para las redes de prueba y redes reales como fue nuestro caso.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) por el apoyo para presentar este trabajo de investigación.

Referencias

[1] A. Sedaghati, "Cost of Transmission System Usage Based on an Economic Measure," *Transactions on Power Systems*, vol. 21, núm. 2, pp. 466- 473, 2006.

[2] K. Bhattacharya, M. H. Bollen, & J. E. Daaler, *Operation of Restructured Power Systems*, Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2001.

[3] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Mexicano, DECRETO por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Energía, 20 diciembre 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo= 5327463&fecha=20/12/2013. [Último acceso: 13 septiembre 2013].

[4] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Mexicano, Ley de la Industria Eléctrica, 11 agosto 2014. [En línea]. Disponible en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LIElec_110814.pdf. [Último acceso: 13 septiembre 2017].

[5] Centro Nacional de Control de Energía, "Formulación Matemática del Modelo de Asignación de Unidades con Restricciones de Seguridad y Cálculo de Precios Marginales Locales y de Servicios Conexos en el Mercado de un Día en Adelanto," enero 2016. [En línea]. Disponible en http://www.cenace.gob.mx/Docs/MercadoOperacion/Formulaci%C3%B3n%20Matem%C3%A1tica%20Modelo%20AU-MDA%20y%20PML%20v2016%20Enero.pdf. [Último acceso: 23 septiembre 2017].

[6] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión Mexicano, *RESOLUCIÓN por la que la Comisión Reguladora de Energía expide las Disposiciones Administrativas de carácter general que contienen los criterios de eficiencia, calidad, confiabilidad, continuidad, seguridad y sustentabilidad del Sistema Eléctrico Nacional*, 08 abril 2016. [En línea]. Disponible en: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5432509&fecha=08/04/2016. [Último acceso: 24 septiembre 2017].

[7] J. W. Lamont, J. Fu, "Cost Analysis of Reactive Power Support," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 14, núm. 3, pp. 890-898, 1999.

[8] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*, México: McGraw Hill, 2007.

[9] J. H. Tovar Hernández, M. Jiménez Jiménez, G. Gutiérrez Alcaráz, "Metodología Basada en Sensibilidades para Asginar Costos de Servicios de Control de Voltaje y Potencia Reactiva en Mercados Eléctricos Desregulados," *Computación y Sistemas*, pp. 58-66, 2002.

[10] S. Luna Quroz, *Estudio de estabilidad transitoria en la red de 400 kV del sistema eléctrico de potencia del área de control oriental para mejorar su confiabilidad*, Puebla: BUAP, 2015.

[11] M. Farzaneh, S. Farokhi, W. A. Chisholm, *Electrical Design of Overhead Power Transmission Lines*, United States of America: McGraw-Hill, 2013.

[12] Comisión Federal de Electricidad, *Curso de Control de Voltaje*, México: CFE, 2011.

[13] Z. Junfang, M. Qinguo, D. Xinzhou, "Real-Time Pricing of Reactive Power Considering Value of Reactive Power Resourses," *CICED*, pp. 1-6, 2008..

[14] P. S. Kate, P. R. Khatri, "Determination or Price of Reactive Power Services in Deregulated Electricity Market Using Particle Swarm Optimization," *National Power Systems Conference*, pp. 1-5, 2012.

[15] X. Hu, *Swarm Intelligence*, 2006. [En línea]. Disponible en: http://www.swarmintelligence.org/index.php. [Último acceso: 19 octubre 2017].

[16] R. L. Bla, S*intonización de un Controlador PID unsando Particle Swarm Optimization en un Control Automático de Generación de un Sistema Eléctrico de Potencia Multiárea*, España: Universidad de Sevilla, 2014.

[17] J. K. Clerc, "The Particle Swarm Explosion, Stability and Convergence in Multidimensional Complex Space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, núm. 1, 2002.

[18] M. Sedighizadeh, A. Rezazadeh, M. Seyed Yazdi, "Pricing of Reactive Power Service in Deregulated Electricity Markets Based on Particle Swarm Optimization," *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 2, núm. 6, pp. 960-963, 2010

[19] O. Fernandez Galindo, *Modelo Estocástico para Evaluar el Costo de Potencia Reactiva de Generación de la Gerencia de Control Regional Oriental del Centro Nacional de Control de Energía*, Puebla: BUAP, 2018

[20] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, R. J. Thomas, "Matpower: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," *Power Systems, IEEE Transactions*, vol. 26, núm.1, pp. 12-19, 2011.

[21] R. D. Zimmerman y C. E. Murillo Sánchez, MATPOWER, 21 febrero 2019. [En línea]. Disponible en: http://www.pserc.cornell.edu/matpower/. [Último acceso: 14 abril 2019].

[22] CENACE, Catálogos de Nodos, 15 junio 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.cenace.gob.mx/paginas/publicas/mercadooperacion/nodosp.aspx. [Último acceso: 27 abril 2019].

[23] L. Y. Villagrán-Villegas, I. V. Hernández-Rodríguez, J. C. Anzelmetti-Zaragoza, A. Marquina-Chávez, C. M. Calderón-Ramón, "Generalidades de estrategias de control en aerogeneradores de transmisión directa," *Científica*, vol. 21, núm. 1, enero-junio 2017.

[24] I. Carvajal-Mariscal, P. Quinto-Diez, J. E. Flores-Ortega, R. Bravo-Cadena, C. A. Real-Ramírez, "Aplicación de la teoría del costo exergético para el análisis de un sistema de refrigeración con subenfriamiento por un enfriador termoeléctrico," *Cientifica*, vol. 21. núm, 1, enero-junio 2017.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a02

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 97-101, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm, mediante un sistema de rejilla Bragg de fibra óptica sintonizada por tensión mecánica*

Raúl **Benítez-Álvarez**

Instituto Politécnico Nacional
Centro de Investigación e Innovación Tecnológica (CIITEC)
Departamento de láser y fibras ópticas
Cerrada cecati s/n Col Santa Catarina alcaldía de Azcapotzalco, CP 02250, Ciudad de México.
MÉXICO

correo electrónico (email):
rbentz-mx@hotmail.com

Recibido 13-02-2020, aceptado 10-04-2020.

Resumen

Una de las características más importantes del análisis espectroscópico es la posibilidad que nos ofrecen las técnicas e instrumentos para explorar las estructuras atómicas y moleculares de algunos compuestos químicos, analizando el efecto directo sobre los fotones de la radiación utilizada para la interacción de materia y energía. Actualmente con el desarrollo de las tecnologías de miniaturización de componentes electrónicos basados en óxido de silicio, es posible diseñar dispositivos ópticos, que partiendo de las leyes de la fotónica, amplían aún más el campo de oportunidad científico y tecnológico de estas técnicas de análisis.

En este trabajo se muestra el diseño de un sistema multicanal basado en fibras de óxido de silicio SiO_2 a los cuales se les imprime una variación en el índice de refracción, con el propósito de ser utilizados como filtros para suprimir líneas de emisión en longitudes de onda particulares; se muestra el resultado en una longitud de onda de interés para las telecomunicaciones a 1550 nm y se describe un diseño conceptual de convertidor multifibra para su fabricación con tecnología de micromaquinado.

Palabras clave: rejillas Bragg, linternas fotónicas, fibra óptica.

Abstract
(Suppression of an Infrared Emission Line at 1550 nm Using a Bragg Fiber Optic Rating System, Tuned by Mechanical Stress)

One of the most important characteristics of spectroscopic analysis is the possibility offered by techniques and instruments to explore the atomic and molecular structures of some chemical compounds, analyzing the direct effect on the photons of the radiation used for the interaction of matter and Energy. At the moment with the development of the technologies of miniaturization of electronic components based on silicon oxide it is possible to design optical devices that, starting from the laws of photonics, further expand the field of scientific and technological opportunity of these analysis techniques.

This work shows the design of a multi-channel system based on SiO_2 silicon oxide fibers to which a variation in the refractive index is printed, with the purpose of being used as filters to suppress emission lines in lengths particular wave; The result obtained in a wavelength of interest for telecommunications at 1550 nm is shown and a conceptual design of a multi-fiber converter for manufacturing with micro-machining technology is described.

Index terms: Bragg grating, photonics converters, optics fiber.

1. Introducción

Convencionalmente las fibras ópticas de óxido de silicio han sido utilizadas ampliamente en el campo de las telecomunicaciones por su gran versatilidad para trasmitir múltiples señales en anchos de bando amplios. Desde su invención en la

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

década de los 60 fue notorio el enorme potencial que representaba el diseño de una guía de onda en donde la información, a diferencia de las comunicaciones basadas en flujo de electrones, cambiaba para dar paso a la trasmisión de ondas electromagnéticas específicamente fotones; sin embargo, a pesar de los avances en las técnicas para la fabricación de fibras ópticas (FO) de bajas pérdidas de potencia, la búsqueda de procesos de manufactura que garanticen la producción de núcleos de óxido de silicio cada vez más puros, permite reconsiderar que tal vez cierto nivel de impurezas podría ser ventajoso para algunos propósitos de interés en fotónica.

Desde el diseño mismo de las fibras ópticas y los fenómenos físicos que le dan sustento como una guía de ondas electromagnéticas, el índice de refracción juega un papel importante al ser uno de los responsables de la propagación de ciertas longitudes de onda a través de la estructura amorfa del SiO_2; sin embargo, el índice de refracción tanto en el núcleo como el revestimiento de la FO está perfectamente definido presentando un cambio notable en la transición entre el núcleo y revestimiento, dando una estructura de paso escalonado en la dirección transversal del material con respecto al eje principal de la guía de onda.

El índice de refracción puede tener un cambio en la dirección de la guía de onda y, en algunos casos, esta variación puede presentar una modulación periódica proporcionando un patrón perfectamente definido. Las impurezas intrínsecas de las fibras de óxido de silicio le imprimen una sensibilidad propia a ciertas longitudes de onda particularmente a la radiación ultravioleta, estableciendo una dependencia funcional con relación a la absorción α_i para cierto intervalo de longitud de onda $\Delta\lambda$ [1]; el índice de refracción cambia sensiblemente y de manera permanente, alterando localmente la densidad del material en un punto particular.

La relación de Kramers-Kroning ayuda mucho a comprender este principio, según la ecuación (1). El cambio en el índice de refracción $\Delta n(\lambda)$ a una cierta longitud de onda λ, se puede estimar como un proceso integrado de varias longitudes de onda discretas λ', cuando estas son medidas en entornos discretos del material con coeficientes de absorción $\Delta\alpha_i$

$$\Delta n(\lambda) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_i \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{\Delta\alpha_i(\lambda')\lambda^2}{\left(\lambda^2 - \lambda'^2\right)} d\lambda' \qquad (1)$$

La técnica para el trazado de estos patrones regulares en el núcleo, modificando el índice de refracción de la fibra óptica, está sustentada en el principio de interferencia constructiva por exposición de haces de radiación UV [2] en los cuales, los tiempos e intensidades de exposición son cuidadosamente controlados para evitar el daño permanente en el material. El resultado de este tratamiento es un dispositivo de mucha utilidad en el campo de la fotónica conocidos como rejillas Bragg de fibra óptica; la interferencia del haz de luz provoca una modulación regular en el índice de refracción a lo largo de la guía de onda. Es posible trazar perturbaciones no regulares (apodizado) en la fibra óptica, dando propiedades particulares a los perfiles de reflexión de la rejilla, una cualidad sumamente útil para mejorar el desempeño del filtrado óptico (véase figura 1).

Una de las cualidades ópticas de este dispositivo es su capacidad para filtrar por reflexión, radiación con longitudes de onda específicas λ_B, esta propiedad está directamente relacionada con la separación longitudinal $l_0 = \Lambda$ (parámetro Bragg) [3] y de la modulación periódica del índice de refracción efectivo n_{eff}, según la ecuación (2).

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \qquad (2)$$

Lograr el acoplamiento de radiación en la fibra óptica, implica conocer no solamente la longitud de onda electromagnética por transmitir, sino también del modo característico de propagación el cual depende de la constante de propagación de fase β y la constante de propagación de la luz en el vacío k; bajo estas condiciones, el índice de refracción asume un carácter efectivo y puede representarse como la proporción relativa de estos dos parámetros n_{eff} [4] según la ecuación (3):

$$n_{eff} = \frac{\beta}{k} \qquad (3)$$

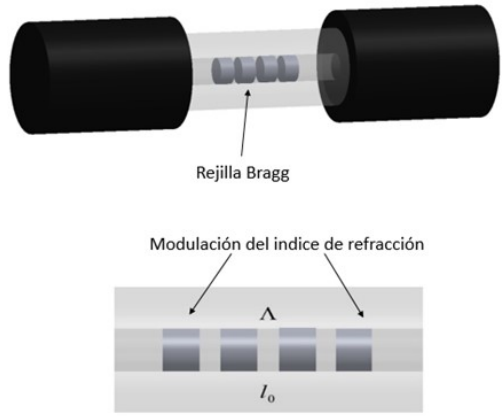


Fig. 1. Perturbación del índice de refracción debido a la incidencia de radiación ultravioleta sobre el núcleo de una fibra óptica.

Científica, vol. 24, núm. 1, pp. 97-101, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a02

2. Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm

La modulación impresa en el núcleo de la fibra permite reflejar solo la radiación cuya longitud de onda sea equiparable a la longitud L_g de la rejilla Bragg; la radiación integrada bajo una constante de acoplamiento κ_{ac}, se descompondrá en dos frentes de radiación; uno de ellos es trasmitido a lo largo del núcleo y el segundo es reflejado conservando un perfil característico acorde a la modulación del índice de refracción según la ecuación (4); este último perfil es el objetivo principal cuando de supresión espectral se refiere en las pruebas de análisis.

$$\rho = \tanh^2(\kappa_{ac} + L_g) \tag{4}$$

La utilidad de esta técnica de supresión se enfoca en aquellos casos donde se requiere eliminar ciertas longitudes de onda que imposibilitan el estudio de señales débiles obstaculizadas por ruidos de emisiones no deseadas, manteniendo en todo momento una adecuada correspondencia en los perfiles típicos de la reflexión en la rejilla y los perfiles de la emisión por filtrar. En la mayoría de los casos los perfiles de radiación acoplados en los núcleos mantienen formas gaussianas pero no necesariamente estos perfiles se equiparan en su forma a los perfiles que resultan de la reflexión ρ; para resolver en parte este problema, se puede proceder en dos sentidos: uno de ellos implicaría el diseño cuidadoso de la modulación del índice de refracción efectivo en el núcleo de las rejillas periódicas y el segundo sería implementar un método de sintonización que implique modificar la modulación del índice de refracción. En este trabajo se muestra el resultado de la sintonización de la rejilla Bragg aplicando tensión mecánica, modificando el parámetro Λ para un pico de emisión próximo a los 1550nm.

Los perfiles típicos de la reflexión para rejillas periódicas se describen a través de la ecuación (4) partiendo de las constantes de acoplamiento κ_{ac} y la longitud de la rejilla L_g [5].

Para probar la viabilidad de estos dispositivos en el filtrado de líneas espectrales complejas como las presentadas por las emisiones infrarrojas del radical OH producidas por excitación vibracional, se montó un prototipo formado por una fuente láser a 1548.80 nm cuyo haz fue acoplado al núcleo de una fibra óptica con una rejilla Bragg inscrita en el núcleo y diseñada para trabajar a 1548.85 nm. El objetivo del experimento fue el simular una de las líneas de emisión del OH con un perfil no gaussiano. La variabilidad de las líneas espectrales en algunos casos podría representar una dificultad para su correcto acoplamiento en el núcleo de la fibra, por esta razón, fue necesario sintonizar paulatinamente la posición del pico de máxima intensidad para hacerlo coincidir con el máximo del

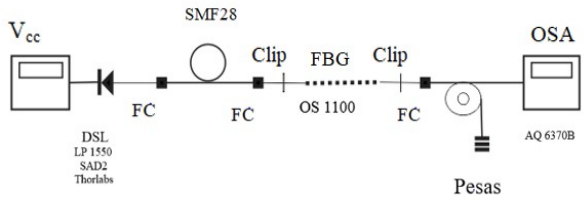


Fig. 2. Setup experimental.

perfil reflejado por la rejilla; en la figura 2 se ilustra esquemáticamente la colocación de las masas de prueba μ, solo como una referencia dentro de la configuración del experimento. La sintonización se logró ejerciendo tensión mecánica mediante cargas de masa previamente seleccionadas, las deformaciones en el interior de la fibra modificaron la separación relativa de las modulaciones en el índice de refracción según la ecuación (5).

El enfrentamiento de los dos perfiles, reflexión y fuente láser, dio como resultado un frente de radiación transmitido y atenuado por efecto de la convolución, que al ser sintonizado con los esfuerzos mecánicos de tensión longitudinal se pudo centrar eficientemente para producir una atenuación del orden de 6.89dB (véase Fig. 3), se puede observar la respuesta en el perfil de transmisión para la configuración entre la rejilla Bragg y la fuente laser conforme se desplaza el máximo de la longitud de onda del perfil reflejado. La imagen corresponde a la carátula del analizador de espectros ópticos Yokogawa AQ6370B, el eje horizontal corresponde a la longitud de onda en nanómetros nm y el eje vertical es la potencia transmitida en miliwatts (mw).

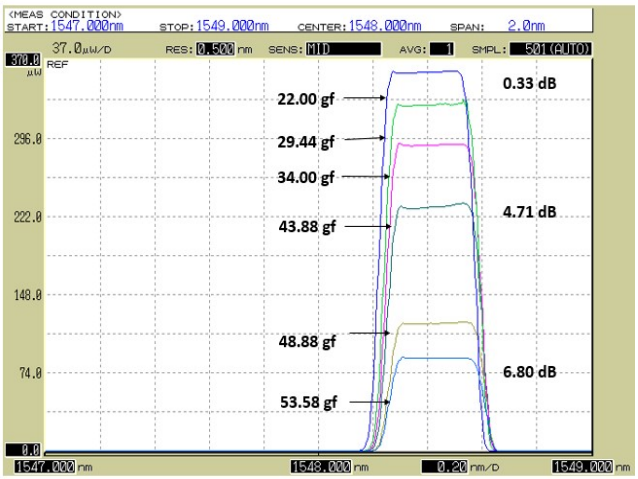


Fig. 3. Acumulación de marcos obtenidos en el analizador de espectros ópticos OSA Yokogawa AQ6370B.

Destaca un comportamiento no lineal de la potencia transmitida, con respecto al periodo de la rejilla. Es importante enfatizar que variando la magnitud del periodo Λ de la rejilla, ya sea por dilatación térmica o deformación longitudinal, se consigue un cambio proporcional a la longitud de onda λ', a la carga μ y a algunos parámetros físicos de la fibra κ, según la ecuación (5) [6].

$$\rho = \tanh^2(\kappa_{ac} + L_g) \tag{5}$$

Los resultados experimentales muestran ciertas regiones en donde la posibilidad de reflejar eficientemente las líneas estrechas es relativamente baja; tomando en cuenta que el ensanchamiento típico de las líneas de emisión están relacionadas fuertemente con el proceso físico que les da origen, este inconveniente podría ser considerado mediante la simulación previa de perfiles gaussianos [7] similares a los presentados en una fuente láser y compararlos con bandas selectivas que se ajusten lo suficientemente a las líneas reales.

3. Propuesta de un convertidor fotónico por micromaquinado

La viabilidad de esta técnica de filtrado sería mucho más eficiente integrando un número importante de rejillas en un solo dispositivo óptico [8]; para lograr este objetivo se plantea la opción de fusionar mediante adelgazamiento (*taper*), una fibra multimodo con un conjunto de fibras mono modo con sus respectivos filtros integrados en el núcleo, formando el convertidor. En este dispositivo, también conocidos como linterna fotónica [9] (véase Fig. 4), la zona de transición requiere de la longitud adecuada para permitir un adelgazamiento gradual que reduzca al máximo la posibilidad de ruptura. Desde su concepción y su implementación en laboratorio, existen varios desafíos de su fabricación por lo complicado que resulta obtener adelgazamientos uniformes en el empalme de las fibras.

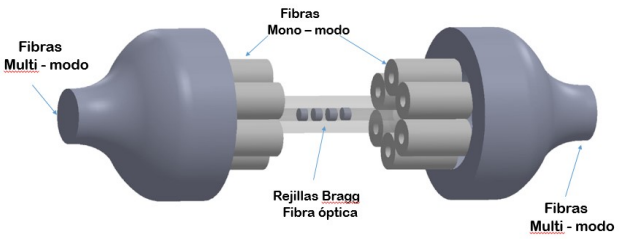


Fig. 4. Linterna fotónica formada por un conjunto de 7 elementos (fibras mono-modo).

Un método comúnmente utilizado para el empalme de fibras consiste en someter a un proceso de calentamiento y estiramiento progresivo al conjunto de fibras colocadas en el interior de un tubo de óxido de silicio con bajo índice de refracción, durante el proceso de formación del *taper*, se presentan irregularidades en el dispositivo que derivan en daños severos en los revestimientos de las fibras, esto se debe a lo difícil que resulta mantener la temperatura adecuada para lograr la flexibilidad del estado viscoso del óxido de silicio en su punto de fusión (véase Fig. 5).

La alternativa es una propuesta que incluye el sistema de sintonización por tensión mecánica y el adelgazamiento de la fibra multi modo previamente procesada; para esto se requiere diseñar el *taper* mediante una técnica de micromaquinado [11]; este método ofrece la ventaja de controlar en todo momento las dimensiones correctas del adelgazamiento a través de la sedimentación por capas de discos diferenciales de óxido de silicio.

En términos generales el diámetro de las fibras ópticas con revestimiento está en el orden de 125 micras, independientemente si se trata de mono-modo o multimodo, esta característica quedan determinadas por los diámetros efectivos de los núcleos, 8-9 micras y 50-100 micras respectivamente. La sección transversal equivalente y su radio R queda en función del número finito de fibras mono modo n; su magnitud tiene una importancia significativa debido a que este valor, limita el número máximo de fibras monomodo permisibles en el *taper*; a mayor número de fibras la longitud del adelgazamiento tendería a ser mayor dando la pauta a una transición progresiva y suave pero sensiblemente frágil; característica que se hace más notorio cuando se recurre a la técnica de estiramiento por calentamiento en la cual presentan rupturas inesperadas en el momento mismo de la formación del *taper*.

La formación del adelgazamiento por técnicas de micro maquinado [11] permitiría diseñar con una mayor precisión, la longitud de la zona de transición monomodo-multimodo, esto implicaría la integración de un número suficientemente grande de elementos diferenciales con radios R' reducidos progresivamente, con la ventaja de mantener en todo momento, el control del diámetro del cuello adelgazado y su resistencia mecánica a diferencia de la técnica de calentamiento.

El uso de fuentes láser con sistemas de excitación adecuada [12] ayudaría a modelar los perfiles complejos de las líneas espectrales generados en procesos radiativos específicos, lo que sin duda sería un aporte significativo para esta técnica de supresión.

Científica, vol. 24, núm. 1, pp. 97-101, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a02

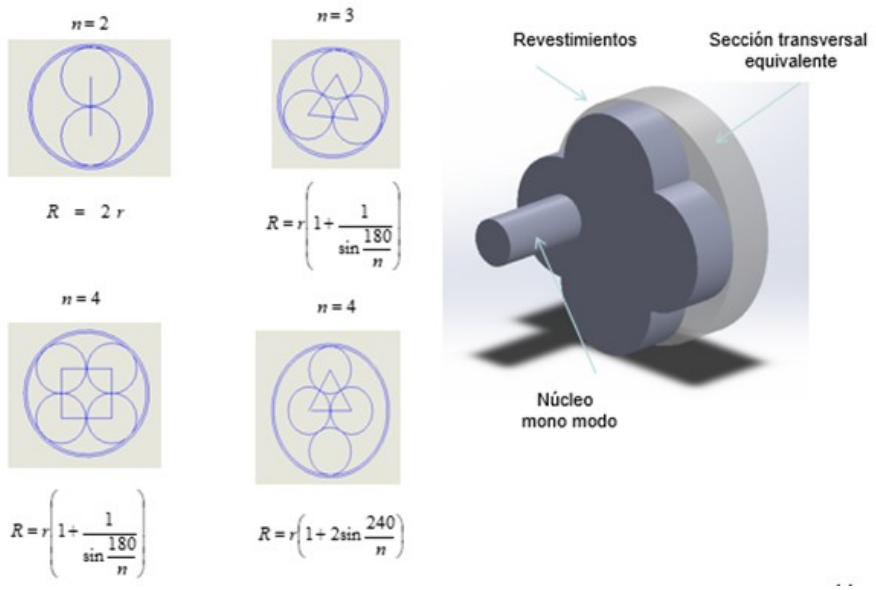


Fig. 5. Linterna fotónica lograda mediante adelgazamiento de un conjunto de fibras mono modo [10].

4. Conclusiones

Con este experimento se pudo demostrar la posibilidad de filtrar líneas espectrales difíciles por sus características de variabilidad mediante la sintonización de una rejilla Bragg de fibra óptica de uso comercial; ampliar el rango de acción de este método conduce inevitablemente a la necesidad de diseñar convertidores de modos mediante el adelgazamiento de fibras ópticas en donde las nuevas técnicas de micromaquinado serían de gran utilidad desde el punto de vista del diseño; no obstante, aún queda por profundizar en el análisis de los inconvenientes técnicos que representa el desafío de construir por sedimentación, discos diferenciales de óxido de silicio que al ser acoplados, puedan tener el mismo desempeño que los *taper* logrados en una fase térmica. El desarrollo tecnológico que implica la manufactura de microelementos ópticos es ampliamente conocido y, sin duda, aún tiene un amplio camino por recorrer, donde áreas importantes como la fotónica tendrán un papel destacado en su desarrollo.

Referencias

[1] D.Y. Smith, *Dispersion theory, sum rules and their application to the analysis of optical data, in: The Handbook of Optical Constants* (Chapter 3). Academic Press, New York,

[2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, núm. 10, pp. 647-649, 1978.

[3] G. Pereira, M. McGugan, L. P. Mikkelsen, "FBG_SiMul V1.0: Fibre Bragg grating signal simulation tool for finite element method models," *SoftwareX*, vol. 5, pp. 163-170, 2016.

[4] J. I. Yamada, M. Saruwatari, K. Asatani, H. Tsuchiya, A. Kawana, K. Sugiyama, T. Kimura, 'High speed optical pulse transmission at 1.29 μm wavelength using low-loss single-mode fibers', *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-14, pp. 791-800, 1978.

[5] R. Kashyap, *Fiber Bragg grating (Chapter 4)*, Elsevier, 2010.

[6] R. Benítez , F. Martínez, V. Orlov, "A new method for actively tuning FBGs to particular infrared wavelengths for OH emission lines supression," *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, pp. 351-361, 2019.

[7] Y. F. Olvera, V. Kasakov "Algoritmos óptimos y no óptimos de reconstrucción de señales aleatorias gaussianas," *Científica*, vol. 17 núm. 3, julio-septiembre 2013,

[8] S. C. Ellis, J. Bland-Hawthorn, "The case for OH suppression at near-infrared wavelengths," *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 386, núm. 1, pp. 47-64, 2008

[9] D. Noordegraaf, P. M. W. Skovgaard, M. D. Maack, J. Bland-Hawthorn, R. Haynes, J. Lægsgaard, " Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port photonic lantern," *Opt. Express,* vol. 18, pp. 4673-4678, 2010.

[10] I.H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica," *J. Opt. Soc. Am.* vol. 15, núm. 1, 1965, pp. 1205-1209.

[11] M. E. Motamedi, "Merging micro-optics with micromechanics: micro-optoelectromechanical (MOEM) devices," Proc. *SPIE 10271, Diffractive and Miniaturized Optics: A Critical Review, 102710G* (28 diciembre1993).

[12] J.Y. Montiel, J.M. De la Rosa "Acoplamiento de impedancias para la excitación con RF de un láser de CO_2," *Científica*, vol. 9 núm. 4, octubre-diciembre 2005.

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

XML JATS en Redalyc

Redalyc ha emprendido una transición y se suma al estándar XML JATS, bajo la especificación JATS4R, lenguaje de metamarcado con reglas simples, que provee de un método uniforme para describir e intercambiar datos estructurados

xmljatsredalyc.org

REDALYC 3.0

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a03

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 103-110, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Modelado para la determinación del poder calorífico de la gasificación de la balsa en instalaciones downdraft mediante redes neuronales artificiales*

Eddy Bladimir **Ibarra-Sánchez**
Álvaro Luis **Oñate-Chiliquinga**
Ángelo Homero **Villavicencio-Poveda**
Eduardo Roberto **Gutiérrez-Gualotuña**

Universidad de las Fuerzas Armadas ¨Espe¨
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
CP 171103
ECUADOR

correos electrónicos (emails):
ebibarra@espe.edu.ec, alonate@espe.edu.ec
ergutierrez@espe.edu.ec, ahvillavicencio@espe.edu.ec

Recibido 13-02-2020, aceptado 29-04-2020.

Resumen

En este trabajo se presentan los principales resultados investigativos obtenidos por los autores en el modelado para la predicción del poder calorífico del gas de síntesis obtenido en instalaciones de gasificación termoquímica downdraft de la madera de balsa, con la incorporación de técnicas basadas en redes neuronales artificiales. Se realizó un análisis del estudio del estado del arte de trabajos de investigación previos vinculados al modelado matemático de estas instalaciones por las diferentes técnicas reflejada en la literatura especializada. El modelado se lleva a cabo mediante una planificación experimental 3^n, con lo que se obtuvo los datos experimentales a los cuales se aplican técnicas de predicción mediante redes neuronales con ayuda de Matlab con resultados satisfactorios. La selección de variables para realizar la experimentación toma en cuenta la ubicación geográfica de donde se obtiene el residuo forestal de la balsa, ya que esta se produce en un clima tropical cálido-húmedo.

Por literatura se conoce que uno de los factores que influye notablemente en el poder calorífico es la humedad. Obviamente la cantidad oxígeno contenida en el aire en el proceso es regulada por una válvula de admisión, además de que es un factor preponderante la masa añadida al proceso. Teniendo en cuenta esto, la red neuronal artificial obtenida permite la predicción del poder calorífico resultante de la gasificación de la balsa con un error de ± 2.6 MJ/g y un ajuste del 86%, lo cual permite realizar una predicción adecuada.

Palabras clave: operación de instalaciones energéticas, gasificación, biomasa, modelado matemático, redes neuronales artificiales, poder calorífico.

Abstract
(Determination of the Calorific Power Value of the Balsa Wood through Artificial Neural Networks Modeling in a Downdraft Gasification Facility)

This work presents the main research results obtained by the authors in the model based on the prediction the calorific power of the synthesis gas obtained through thermochemical downdraft gasification facilities of the boat wood with the of techniques of artificial neural networks. An analysis of the state-of-the-art study of previous research work linked to the mathematical modeling of these facilities was made out by the different techniques reflected in the specialized literature. The modeling is carried out using experimental factor 3^n, which is applied in the adquisition of experimental data; with the help of Matlab the prediction tecniques applied on neural networks are performed over the data with satisfactory results.The selection of variables for experimentation takes into account the geographical location from which the forest waste is obtained from the raft, as it is produced in a warm- humid tropical climate.

Literature is known that one of the factors that significantly influences calorific power is moisture. Obviously, the amount of oxygen contained in the air in the process is regulated by an intake valve, furthermore is a predominant factor in the mass added to the process. Considering this, the artificial neural network obtained allows the prediction calorific power resulting from the gasification of the raft with an error of 2.6 MJ/g and an adjustment of 86 %, which allows for an appropriate prediction.

Index terms: gasification, biomass, mathematical modeling, artificial neural networks, caloric power.

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

1. Introducción

El creciente consumo energético de nuestra sociedad, unido a la persistencia de la crisis energética global por el agotamiento de las fuentes energéticas tradicionales, ha propiciado la búsqueda de fuentes alternativas de energía que permitan aminorar la utilización de estas reservas energética no renovables. Una de las fuentes mayoritarias presentes está constituida por la biomasa, de la que se dispone en abundancia y tiene mucho menor impacto al medio ambiente que los combustibles tradicionales [1].

La gasificación de la biomasa es un proceso complejo que involucra varias reacciones químicas y procesos de intercambio de calor y masa. La gasificación es la conversión de un caudal de materia sólida en un combustible gaseoso o líquido que puede ser quemado para liberar energía o ser utilizado para la producción de sustancias químicas valiosas [2]. Este proceso requiere de un agente gasificante (aire, oxígeno o vapor) para reordenar la estructura molecular de la biomasa y convertirla en un combustible útil con el incremento de la relación hidrógeno-carbón (H/C) [3].

En general, el proceso de gasificación depende de varios factores, entre ellos se destaca la temperatura de pirólisis, parámetro que determina el rompimiento de la molécula de la biomasa mediante la reacción de reducción que se produce a una presión determinada dentro del reactor [4]. El análisis real del proceso de gasificación, por su complejidad y diversidad de procesos termoquímicos presenta numerosas dificultades de análisis, razón por la cual los modelos matemáticos tienen vital importancia en la predicción del comportamiento del reactor, ya que proveen sistemas de ecuaciones que permiten simular o predecir el comportamiento de la instalación energética [5], [6], [7], [8], [9], [10], [16]. [21], [22], en estas dos últimas investigaciones se estudian biomasas residuales. En [21], la biomasa de residuos agrícolas de cacao, Cacao CCN51. Mientras que en [22], se estudian los residuos de *Eichhorniacrassipes* "lechugín", cascarilla de arroz y leña. Además, en un reciente estudio, [23] elaboraron modelos matemáticos para la estimación de los poderes calóricos superior e inferior, velocidad de ignición superior e inferior y densidad obtenida como función de los parámetros de fabricación para lograr una combustión completa en el olote de *Zea Mays L.*

En la bibliografía especializada se reflejan algunos trabajos sobre diferentes tipos de modelado de este proceso. [5] Utilizan modelos de equilibrio termodinámico para predecir la composición del gas de síntesis al suponer una mezcla de reactivos en un tiempo infinito. La dificultad de empleo de este método radica en la posible introducción de errores por la no consideración de todas las reacciones existentes en el proceso. [2] Emplea un modelo no estequiométrico en el que se minimiza la energía libre de Gibbs, el cual, aunque no se toma en cuenta la presencia de las reacciones, su análisis y correcto planteamiento es más complejo por lo que se tiende a realizar simplificaciones en la determinación de los parámetros termodinámicos, con lo que se reduce el grado de generalización [11].

En [12] se emplea un modelo de tipo cinético que, al igual que el modelo anterior, se enfoca en realizar un análisis al gas de síntesis producto del proceso y predecir su rendimiento en función de su composición en un volumen de control para un tiempo dado. Con este modelo se predicen los perfiles tanto de composición del syngas como de temperatura dentro del reactor. Aquí se considera la cinética existente en las diferentes reacciones, las condiciones hidrodinámicas y balances de masa y energía. A pesar ello, estos modelos requieren de la determinación de parámetros hidrodinámicos que suelen ser difíciles de obtener, además de que requieren un gran consumo de recursos computacionales para su resolución [13], [15]. Como se puede notar, el modelado a partir de estos tipos de modelos resulta ser muy complejo por la necesidad de incorporar en los procedimientos de cálculo parámetros termodinámicos y cinéticos que son difíciles de precisar y de los que, en la mayoría de los casos, se carece de información precisa por lo cual se requiere de realización previa de mediciones experimentales. Por estas razones, algunos autores han empleado técnicas de modelado avanzadas que permiten la predicción del comportamiento de los sistemas a partir de la adquisición de datos menos complejos de obtener experimentalmente.

En este sentido, [14] y [17] reflejan, en su revisión y análisis de los modelos de gasificación de biomasa, el empleo de las redes neuronales para predecir el comportamiento de un reactor para producción del gas y otros componentes, Estos autores realizan una descripción del proceso de creación de un modelo de red neuronal artificial que sirve como estimador del proceso de gasificación medido en parámetros no difíciles de modelar y demuestran la capacidad de aproximación de este tipo de modelos, incluso al considerar otros intervalos de valores de las variables empleadas para la predicción de indicadores.

Por las razones expuestas anteriormente, el alcance que presenta este artículo es el desarrollo de un modelo de predicción del poder calorífico del gas resultante de la gasificación de la madera en un reactor de tipo downdraft mediante redes neuronales artificiales y la realización de mediciones experimentales activas.

2. Materiales y métodos

En la determinación del poder calorífico del gas obtenido de un proceso de gasificación es necesario la consideración no solo de los parámetros termodinámicos, también es necesario

considerar aquellos parámetros de operación del gasificador que permiten variar las condiciones de realización de este proceso. Básicamente, la regulación de las condiciones internas del reactor se determina en función de la temperatura de pirolización, la cantidad de biomasa que se introduce y el caudal de aire que se incorpora al sistema.

Este último parámetro de operación se regula a partir de la apertura de una válvula que posibilita la succión del aire para que se produzca el efecto cigarro requerido para la generación de gas. Esta entrada de aire también regula el caudal de aire de combustión que entra al gasificador y por tanto también permite regular la temperatura en su interior. La humedad de la biomasa también constituye un parámetro crucial en la calidad del proceso de gasificación pues su presencia consume energía como parte del proceso previo de secado además de aportar vapor de agua como parte de los gases que se generan.

A partir de este análisis, las variables independientes por considerar para la predicción del poder calorífico del gas son:

- Humedad, *Hu*.
- Cantidad de biomasa, *Cbio*.
- Porciento de apertura de la válvula, *ApV*.

Para estas variables se seleccionaron los niveles: 12%, 16%, 20%; 1 kg, 3 kg, 5 kg; 25%, 50% y 100%, respectivamente. Como variable dependiente se define:

- El poder calórico del gas, *PC*.

El plan experimental se concibió con una estructura $3n$ (niveles alto, medio y bajo, para tres variables, $n = 3$) con tres réplicas para un total de 81 juegos de datos. Esta estructura de experimentación tiene como finalidad la consideración del carácter no lineal de las relaciones entre las variables y para reflejar los factores casuales que se presenten, incluyendo los errores de medición.

La instalación experimental constituida por un gasificador tipo *downdraft* con una capacidad de 10 kW. El aseguramiento experimental está compuesto por un medidor de humedad MD914 con un intervalo de medición de 2 a 60% con una resolución de 0.5%, un sensor de nivel controlado mediante una paleta para censar el nivel de biomasa, una alarma digital de detección de CO marca Kidde con un intervalo de medición de 30-999 PPM con ±30% de error. Las mediciones del poder calorífico del gas generado se realizaron con un cromatógrafo de gases con espectrómetro de masa GC-MS a partir de muestras almacenadas en bolsas colectoras de plástico esterilizadas y extraídas del colector de gas. El control se lo realiza en un programa desarrollado en el software LabVIEW de la *National Instruments*.

El proceso de control del gasificador empieza con la medición en su gran mayoría de las termocuplas cuyas señales son enviadas a una tarjeta de adquisición de datos *myRIO* quien al mismo tiempo envía la señal transformada a un computador, donde se puede verificar al mismo tiempo la entrada de aire por medio de la apertura o cierre en forma manual de una válvula de admisión de aire conectada a un sistema Venturi, el mismo que absorberá el aire en el reactor y al mismo tiempo el gas producido para obtener el efecto de gasificación, ya que este proceso se produce por una baja cantidad de oxígeno.

El objetivo de esta experimentación es proporcionar los datos numéricos necesarios para la predicción de los valores de poder calorífico del gas generado por el gasificador como función de los parámetros de entrada indicados y como se muestra en la expresión (1). Estos parámetros han sido considerados representativos del sistema para poder evaluar el poder calorífico inferior y superior de una biomasa como lo mencionan [21], [22] en sus respectivas investigaciones.

$$PC = f(Hu, Cbio, ApV) \tag{1}$$

Debido al poco grado de relación analítica que se presentan entre las variables independientes y la variable dependiente, es necesario la utilización de una estructura de modelado que permita determinar, bajo ciertas reglas funcionales, los valores de salida del modelo según los valores de las variables indicadas como entradas [19]. Para ello, se utilizan las técnicas de inteligencia artificial, dentro de las que se destacan las redes neuronales artificiales para la predicción de datos [18], [20].

Selección del algoritmo de regularización bayesiana

La regularización bayesiana es una de las más poderosas técnicas de entrenamiento de perceptores multicapa. Tiene una alta capacidad de generalizar el ajuste de la red con un bajo sobre entrenamiento de la red mediante la optimización de los pesos de la red neuronal simultáneamente con el análisis de la capacidad de generalización de la red. Este sobreentrenamiento significa que la red ha aprendido la información que se le ha suministrado en el proceso de aprendizaje a tal punto que ha modelado el ruido presente en la misma. La selección del algoritmo para la elaboración de la red neuronal se realizó a partir de múltiples entrenamientos seleccionando grupos aleatorios de datos de entrada y de salida y comparando los resultados finales (véase Tabla 3), fundamentalmente la capacidad de ajuste de la red a los datos suministrados para el entrenamiento y validación (70% vs 30%), siendo el algoritmo de regularización bayesiana el de mejores resultados durante las pruebas realizadas.

3. Diseño experimental

El plan experimental se concibió con una estructura 3^N (alto, medio y bajo, por variables) con tres réplicas, con el fin de tomar en consideración el carácter necesariamente no lineal de las relaciones requeridas y que queden reflejados los factores casuales, incluyendo los errores de medición, para modelar los indicadores de desempeño como función de las variables de operación, con ayuda de modelos de regresión no lineales. Para la recopilación automatizada de la información experimental, se diseñó e implementó en la instalación una tarjeta de adquisición de datos *myRIO* y la interface maquina hombre con un programa desarrollado en LabView.

La instrumentación utilizada consta de una alarma digital de detección de CO marca Kidde con una intervalo de medición de 30-999 PPM con error ±30% de la magnitud medida en condiciones normales, un medidor de humedad MD914 con un intervalo de medición de 2 a 60% una resolución de 0.5% un sensor de nivel de combustible controlado mediante una paleta para censar el nivel de biomasa, 8 termocuplas tipo *k*, con intervalo de medición de 0 a 1250°C de temperatura con un límite de error ± 2.2% °C de chromel –alumel y un cable de compensación KX– ubicadas de la siguiente forma: cuatro para las zonas de reducción, pirolisis, combustión y secado, una en la descarga de cenizas, y tres para censar las temperaturas del gas a la entrada del ciclón, a la entrada del intercambiador de calor y a la salida del intercambiador de calor, así como de dos manómetros de agua tipo *U* con intervalo de medición de 200 mm de H_2O, con error de medición de ± 1 mm de H_2O uno de ellos toma la diferencia de presión existente en el reactor y el otro en la placa orificio para medición de caudal másico de aire de ingreso en las diferentes aperturas de válvula. La disposición de toda la instrumentación se ilustra en la Fig. 1.

Para elaborar las ecuaciones de regresión que se ajusten adecuadamente a los resultados experimentales se utilizan las técnicas de linealización de modelos expuesta en el libro *Sistemas de Ingeniería* [16].

En particular, si a ambos miembros del modelo monomial (1), como se puede observar en la ecuación 2:

$$y = cx_1^{\alpha_1}\ x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n} \qquad (2)$$

donde $c, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \in R \neq 0$

Se le hallan los logaritmos que se obtiene de la ecuación 3:

$$\log y = \log c + \alpha_1 \log\ x_1 + \alpha_2 \log\ x_2 + \dots + \alpha_n \log\ x \qquad (3)$$

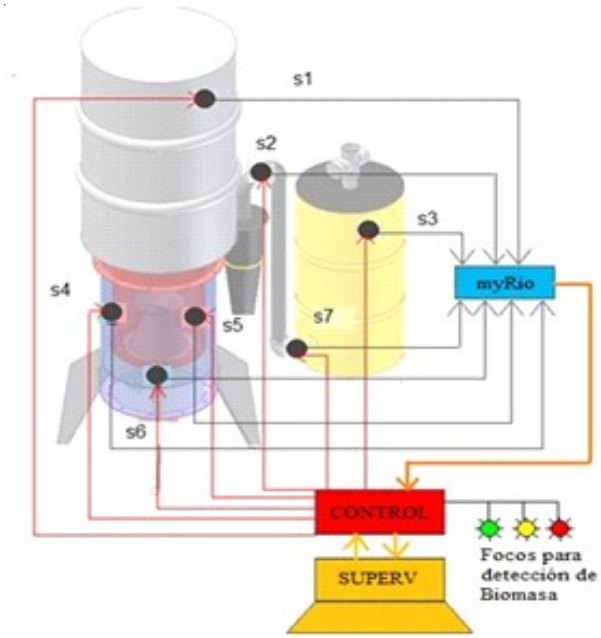


Fig. 1. Puntos de control del gasificador tipo downdraft. s1: termocupla 1 (temperatura ambiente), s2: termocupla 2 (temperatura del gas a la salida del ciclón), s3: termocupla 3 (temperatura del gas a entrada a la TEA de combustión), s4: termocupla 4 (temperatura en la zona de pirolisis), s5: termocupla 5 (temperatura en la zona de combustión), s6: termocupla 6 (temperatura de cenizas), s7: termocupla 7 (temperatura de entrada al filtro).

de donde se deduce que los coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ constituyen potencias de mejor ajuste del monomial (2) o de cualquier composición de productos $x_i^{\alpha i} x_j^{\alpha j} \dots$.

De igual forma se pueden generar términos exponenciales, recíprocos y otros. Se utilizará el siguiente esquema de búsqueda de modelos [16]:

1. Como primer paso se selecciona todos los factores considerados "sospechosos" que tengan influencia directa en la variable dependiente y generación de los factores analizados. En este punto se utilizaron algunos procedimientos considerados como auxiliares diferentes. Por ejemplo, los factores de interacción entre las variables se pueden establecer mediante un modelo monomial auxiliar, que incluye todas las variables de la interacción; luego de hallada la ecuación de regresión de este modelo auxiliar queda esclarecidos los exponentes más adecuados del factor de interacción.

2. Como resultado se obtiene una expresión matemática de regresión donde intervienen todos los factores considerados como "sospechosos" (*k* factores).

3. Se procede a registrar un coeficiente de correlación múltiple, además el error estándar de la expresión matemática (ecuación).

4. Se encuentra una ecuación nueva con regresión de $k - 1$ factores, excluyendo el factor que tiene el coeficiente más pequeño de la correlación parcial.

5. Al observar el incremento del coeficiente de correlación múltiple o el error estándar, es necesario repetir el proceso (al inicio los dos coeficientes tienden a mejorar, sin embargo, en los posterior el coeficiente de correlación múltiple empezará a disminuir mientras que el error estándar continuará con tendencia a bajar).

6. Como punto final, es importante verificar que se cumplan todos los puntos anteriores. Para el intervalo de un error estándar $2\sigma \leq \delta$, (σ representa el error estándar de la ecuación y δ es el error máximo).

4. Resultados

Para crear la red neuronal artificial (RNA) se utilizó la herramienta denominada Neural Net Fitting perteneciente al Deep Learning Toolbox 12.0 de Matlab R2018b (licencia estudiantil), la que permite crear RNA para la resolución de problemas de ajustes utilizando redes de tipo feed-forward con hasta dos capas de neuronas ocultas. Esta herramienta realiza, además, toda la gestión de información de entrada-salida para poder variar operativamente la configuración de la red y visualizar el comportamiento de los indicadores R^2 y el error de ajuste mediante el MSE con respecto a los datos seleccionados para entrenar la red y para su validación (véase tablas 1, 2 y 3).

Para el entrenamiento de las redes se adoptó un 15% de los datos para la validación, un 15% para la verificación y el 70% para el entrenamiento. En la capa oculta se utilizan seis neuronas, según se puede observar en la Fig. 2. Este entrena-

Tabla 1. Resumen de resultados de las muestras obtenidas según el perfil de secado.

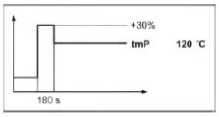
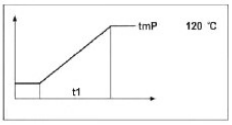
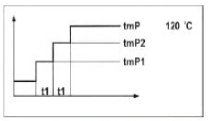
Perfil secado rápido Pr_02						
Temp. Trabajo 70°C	Masa Inicial [Mi][g]	1,5027 [g]				
	Tiempo [min]	1	2	3	4	5
	Pérdida de masa porcentual [%M]	6.908	7.7316	8.0438	8.1235	8.1966
	Masa seca conseguida %D	93.0521	92.2684	91.9495	91.8765	91.8034
	% R	7.505	8.3775	8.7553	8.889	8.9284
Figura 1. Esquema de Comportamiento del Perfil Rápido	Masa Final a los N min [g]	1.4019	1.3891	1.3845	1.3833	1.3821
Perfil secado suave Pr_03						
Temp. Trabajo 70°C	Masa Inicial [Mi][g]	1,5000 [g]				
	Tiempo [min]	1	2	3	4	5
	Pérdida de masa porcentual [%M]	1.3332	3.0998	4.7797	6.2263	7.2662
	Masa seca conseguida %D	98.6268	96.8602	95.187	93.7471	92.7072
	%R	1.4129	3.2771	5.1005	6.7003	7.8743
Figura 2. Esquema de Comportamiento del Perfil Suave	Masa Final a los N min [g]	1.4806	1.4542	1.4288	1.407	1.3914
Perfil secado escalonado Pr_04						
Temp. Trabajo 70°C	Masa Inicial [Mi][g]	1,4998 [g]				
	Tiempo [min]	1	2	3	4	5
	Pérdida de masa porcentual [%M]	3.5767	4.5776	5.2983	5.7387	5.9722
	Masa seca conseguida %D	96.3699	95.409	94.695	94.2747	94.0278
	%R	3.7955	4.8339	5.6021	6.0881	6.3516
Figura 3. Esquema de Comportamiento del Perfil Escalonado	Masa Final a los N min [g]	1.4452	1.4303	1.4194	1.4128	1.4091

Tabla 2. Parámetros para la toma de datos del poder calorífico de la madera de balsa.

ÁCIDO BENZOICO			
1	Valor calorífico del ácido benzoico	J/gr	26454
2	Peso del ácido benzoico quemado	gr	1
3	Energía liberada por el ácido	J	26454
4	Temperatura inicial	°C	21
5	Temperatura final	°C	23,29
6	Elevación de temperatura	°C	2,29
7	Capacidad calorífica total	kJ/ °C	11,551

miento está basado en estudios anteriores [24]. En la Fig. 3 se indica la estructura de la red neuronal finalmente obtenida

La función de trasferencia empleada para la realización del ajuste es la función tangente sigmoidal, la cual es establecida por defecto por esta herramienta de Matlab. Esta función entrega una salida que se encuentra en el rango de (–1.0 a 1.0) y es utilizada con frecuencia para el ajuste de datos en problemas similares al estudiado [20]. El entrenamiento de la red se realizó mediante el algoritmo de regularización bayesiana, el cual, si bien requiere más tiempo de cálculo para la determinación de los coeficientes de pesos w en los nodos de la red, por la utilización de un procedimiento de tipo adaptativo, resultó ser el más adecuado para el ajuste de los datos según las pruebas realizadas a priori con todas las opciones de algoritmos disponibles a emplear.

A partir de los entrenamientos realizados para cada tipo de gasolina, se determinaron los coeficientes óptimos de pesos w y los coeficientes bias b para la capa oculta (w_{co} y b_{co}) y para la capa de salida (w_{cs} y b_{cs}) en dada red elaborada. En lo adelante se muestran los valores correspondientes.

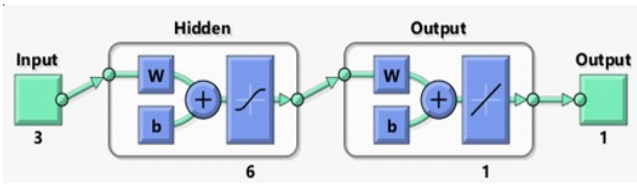


Fig. 2. Esquema general de la RNA empleada. Figura generada por Matlab R2018b.

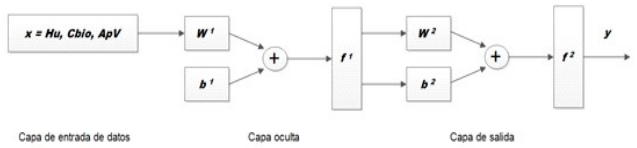


Fig. 3. Estructura de la red neuronal encontrada para todas y cada una de las salidas.

$$b_{co} = \begin{bmatrix} -0.3688 \\ 0.1408 \\ -1.9988 \\ 1.78437 \\ -0.7797 \\ -0.34859 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$w_{co} = \begin{bmatrix} 0.7528 & -0.1012 & -0.7479 \\ -0.1219 & 0.7359 & 0.1844 \\ 0.8664 & -0.3137 & -1.1662 \\ -1.0887 & 1.1292 & 1.2528 \\ -0.5401 & 0.7283 & 0.5136 \\ -1.1680 & 0.1279 & 0.7265 \end{bmatrix} \tag{5}$$

Tabla 3. Muestras representativas utilizadas en el entrenamiento de las redes neuronales artificiales.

MUESTRA			Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7 (Fresca)	Muestra 8	Muestra 9
1	Peso del combustible	gr	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
2	Temperatura inicial	°C	21	21	21	21	21	21	21	21	21
3	Temperatura final	°C	22,32	22,34	22,34	22,36	22,37	22,24	22,3	22,37	22,28
4	Elevación de temperatura	°C	1,32	1,34	1,34	1,36	1,37	1,24	1,3	1,37	1,28
5	Energía total liberada	kJ	15,248	15,479	15,479	15,710	15,826	14,324	15,017	15,826	14,786
6	Valor calorífico de la muestra	MJ/kg	19,060	19,349	19,349	19,638	19,782	17,905	18,771	19,782	18,483
7	Presión de Oxígeno utilizada	Bar	15	15	18	20	20	20	20	15	22

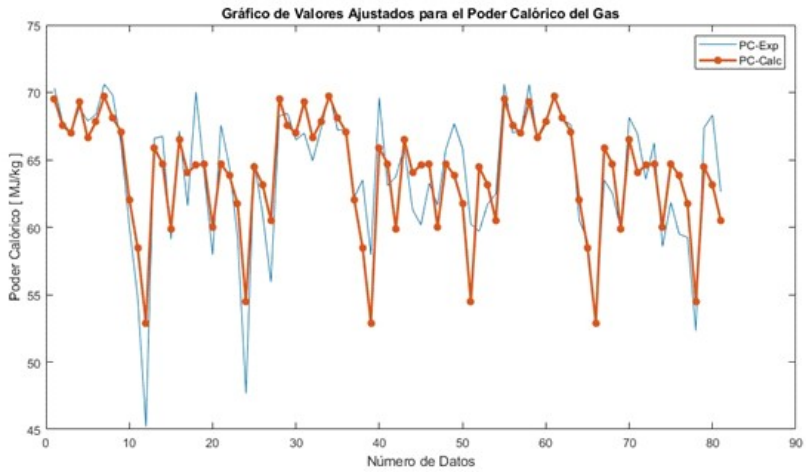


Fig. 4. Ajuste de la RNA desarrollada para la predicción del poder calorífico del gas.

$$b_s = [1.3697] \quad (6)$$

$$w_{cs} = [-0.7098 \;\; -0.7504 \;\; 17938 \;\; 1.2453 \;\; 0.8835 \;\; -0.6736] \quad (7)$$

El porcentaje de ajuste obtenido mediante la predicción de la red neuronal artificial es de $R^2 = 86.07\%$ con un error $S = 2.63$. Para analizar la bondad de ajuste de la RNA elaborada se genera el gráfico de ajustes de los valores estimados y los valores predichos para el 100% de los datos de entrada. En la Fig. 2 se muestran el gráfico correspondiente a cada uno de los valores de poder calorífico de la biomasa predicho mediante la red desarrollada para el proceso de gasificación de la madera de balsa objeto de estudio.

Como se puede observar en la Fig. 4, el ajuste mostrado por la RNA es satisfactorio por lo cual se considera válida para la realización de predicciones sobre el poder calorífico del gas obtenido mediante la gasificación de la madera de balsa sin necesidad de realizar los costosos experimentos necesarios para ello, aunque es válido destacar la necesidad de reentrenamiento periódico de esta red, incorporando nuevos valores mediante la realización de experimentos pasivos para mejorar progresivamente su ajuste.

5. Conclusiones

Como conclusiones del trabajo realizado y las mediciones experimentales obtenidas donde se obtuvieron un número de datos suficientes para la realización del análisis requerido para el desarrollo del modelado y la predicción del poder calórico de del gas en el proceso de gasificación de la madera de balsa y la definición de los parámetros de entradas en este proceso.

La aplicación de las herramientas modernas de análisis y modelado implementadas en Matlab permitieron el desarrollo de un modelo de red neuronal artificial de tipo feed-forward con una capa oculta de seis neuronas, a las que se les identificaron los coeficientes bias (b) y los coeficientes de pesos de los nodos (w) mediante el entrenamiento con el 70% de los datos de entada para la realización de predicciones PC de gas en gasificación de materia orgánica lignocelulósica (biomasa) estudiada esta investigación.

La red neuronal artificial obtenida en este estudio, permite la predicción del poder calorífico resultante de la gasificación de la madera de balsa con un error de 2.6 y un ajuste del 86% aproximadamente, lo cual ayuda a realizar una adecuada predicción sobre el valor de esta propiedad energética, como alternativa a la carencia de procedimientos analíticos de alta precisión para su determinación.

Referencias

[1] International Energy Agency (IEA), *Good practice guidelines: bioenergy project development and biomass supply*, OECD/IEA, 2007, Francia.

[2] P. Basu, *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*, MA, U.S., Elsevier, 2010.

[3] P. Basu, *Combustion and gasification in fluidized beds*", London: Taylor & Francis Group/CRC Press, 2006.

[4] A. K. Sharma, "Experimental investigations on a 20 kWe, solid biomass gasification system," *Biomass Bioenergy*, 2011, vol. 35, pp. 421-8.

[5] S. Shabbar, "Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization

method," *Energy Convers Manage*, 2013, vol. 65, pp. 755-63.

[6] N.S. Barman, "Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier: a realistic model including tar," *Bioresour Technol*., 2012, vol. 107, pp. 505-11.

[7] E. Azzone, "Development of an equilibrium model for the simulation of thermochemical gasification and application to agricultural residues," *Renewable Energy*, 2012, vol. 46, pp. 248-54.

[8] J. Xie, "Simulation on gasification of forestry residues in fluidized beds by Eulerian Lagrangian approach," *Bioresour Technol*., 2012, vol. 121, pp. 36-46.

[9] I. Janajreh, M. Al Shrah, "Numerical and experimental investigation of downdraft gasification of woodchips," *Energy Convers Manage*, 2013, vol. 65, pp. 783-92.

[10] M. P. Arnavat, "Artificial neural network models for biomass gasification in fluidized bed gasifiers," *Biomass Bioenergy*, 2013, vol. 49, pp. 279-89.

[11] J. Han, "Modeling downdraft biomass gasi?cation process by restricting chemical reaction equilibrium with Aspen Plus," *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 153, pp. 641-648.

[12] M. Puig-Arnavat, "Review and analysis of biomass gasification models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, pp. 2841-2851.

[13] D. Baruah, "Renewable and Sustainable Energy Reviews," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 806-815.

[14] M. Puig-Arnavat, "Review and analysis of biomass gasification models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, vol. 14, pp. 2841-2851.

[15] M. Fani, M. H. Niri, F. Joda, "A simplified dynamic thermokinetic-based model of wood gasification process," *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2018, vol. 2, núm. 3, pp. 269-279.

[16] Y. Li, L. Yan, B. Yang, W. Gao, M.R. Farahani, "Simulation of biomass gasification in a fluidized bed by artificial neural network (ANN)," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 40, núm. 5, pp. 544-548.

[17] T. Y. Ahmed, "Renewable and Sustainable Energy Reviews", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 2304-2315.

[18] C. Pérez, *Redes neuronales a través de ejemplos: aplicaciones con MATLAB*, España, 2017.

[19] P. Ponce, *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*, España, 2011.

[20] F. Berzal, *Redes Neuronales & Deep Learning*, Granada, España, 2018.

[21] C. A. Carvajal-Jara, P. M. Tafur-Escanta, A.H. Villavicencio-Poveda, E. R. Gutiérrez-Gualotuña, "Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico," *Científica*, vol. 22, núm. 2, 2018, pp. 113-123.

[22] E. R. Gutiérrez-Gualotuña, J. A. Soria-Amancha, P. M. Tafur-Escanta, N. Rodríguez-Trujillo, A. H. Villavicencio-Poveda, J. Arzola-Ruiz, "Modelos matemáticos de los parámetros energéticos de desempeño de gasificadores tipo downdraft mediante técnicas de regresión," *Científica*, vol. 23, núm. 1, 2019, pp. 61-81.

[23] M. S. Arroyo-López, F. M. Guerrero-Espinosa, E. R. Gutiérrez-Gualotuña, "Análisis comparativo de la densidad y velocidad de ignición óptimas para la combustión completa del olote perteneciente al *Zea Mays L.*," *Científica*, vol. 23, núm. 1, 2019, pp. 43-50.

[24] E. R. Gutiérrez Gualotuña, J. Almeida Mera, J. C., J. Arzola Ruiz, "Modelado de indicadores de operación de un gasificador downdraft por redes neuronales para biomasa Eichhornia Crassipes," *Ingeniería Energética*, vol. 40, núm. 3, 2019, pp. 212-222.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a03

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 111-123, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Estado del arte, optimización del modelo RLC y retos de fabricación de interconectores para alta frecuencia con base en nanotubos de carbono*

Irving **Larruz-Castillo**[1]
Aníbal **Pacheco-Sánchez**[2]
Donato **Valdez-Peréz**[1]

[1]Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Edificio Z4 3er piso
07738, Ciudad de México
MÉXICO
[2]Universitat Autonoma de Barcelona
Department d'Enginyeria Electronica
08193, Bellaterra (Cerdanyola del Vallès)
ESPAÑA

correos electrónicos (emails):
ilarruzc1700@alumno.ipn.mx
anibaluriel.pacheco@uab.cat
dvaldez@ipn.mx

Recibido 31-01-2020, aceptado 29-05-2020.

Resumen

En el siguiente documento se hace una revisión bibliográfica sobre las propiedades eléctricas de los nanotubos de carbono (CNT) en altas frecuencias y como han sido implementados como interconectores en diferentes dispositivos. Se muestran los resultados de dichas implementaciones y se analizan para su interpretación. De la bibliografía revisada, se selecciona un modelo RLC de interconectores con base en CNT y se hace un estudio del mismo. Se obtiene una función para la impedancia del dispositivo y utilizando los valores teóricos sugeridos para el modelo RLC, se extiende su análisis en altas frecuencias (<100 GHz). A partir de la representación matricial tipo ABCD de los componentes del circuito equivalente, se calculan las ecuaciones de los parámetros de dispersión (*S*) para este dispositivo. A partir de esta ecuación característica se realiza una optimización de los componentes del circuito RLC hacia una correcta descripción de los datos experimentales del dispositivo. Por último, se discuten los retos en la fabricación de interconectores con base en CNT.

Palabras clave: ecuación de impedancia, modelo compacto, parámetros S, parámetros ABCD, estado del arte.

Abstract
(State-of-the-art RLC Model Optimization and Fabrication Challenges of High-Frequency Carbon Nanotube-Based Interconnectors)

A literature review about the carbon nanotubes (CNTs) high-frequency electrical properties and their applications is exhibited on the following paper. The results of these implementations are shown and analyzed. A CNT-based RLC model for interconnectors is selected and a brief analysis of it is performed on detail. The device impedance function is obtained and by using the suggested values of the CNT-interconnects an analysis at high frequencies (<100 GHz) is presented. The device scattering parameters (*S*) equations are calculated from the ABCD matrix representation of equivalent circuit components. An optimization of such characteristic equation using the RLC circuit components towards the description of the experimental device data is performed. Lastly, the challenges of the CNTs based interconnectors fabrication used on different devices are discussed.

Index terms: ABCD-parameters, compact-model, impedance equation, literature review, S-parameters, literature review.

1. Introducción

Gran número de importantes compañías han perseguido el diseño eficiente de los transistores, los cuales ofrezcan velocidades de respuesta elevados y a su vez sean lo más com-

*Este artículo es la versión extendida de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

pactos posibles. La miniaturización de los transistores ha permitido mejoras en los circuitos integrados (CI) tanto en el desempeño, potencia, reducción de costos de fabricación y mayor densidad de transistores embebidos que pueden optimizar la funcionalidad de los CI [1].

Además de perseguir las características descritas anteriormente en un transistor, la industria de los semiconductores busca propiedades específicas en interconectores las cuales se ven afectadas por el escalamiento en dimensión [2], [3]. Cuando el tamaño del dispositivo disminuye la resistencia producida por los interconectores aumenta, sin mencionar que a mayor densidad de interconectores la capacitancia de acoplamiento entre ellos y los dispositivos activos aumenta [1].

El propósito fundamental de un interconector es proporcionar una comunicación entre dos regiones o bloques dentro de un CI por medio de señales, las cuales pueden ser señales de alta frecuencia, de potencia, entre otras. El verdadero desafío al diseñar un interconector será implementar una estructura adecuada para el tipo de señal que será transmitida de un bloque a otro, para ello se hacen uso de diferentes métricas como lo son: el retraso de la señal, el ancho de banda necesario, la cantidad de potencia que se transmite, inclusive el área que se utilizará dentro del CI. Estas métricas mencionadas estarán ligadas a las propiedades físicas del material utilizado como interconector, es decir, su resistencia por longitud, la capacitancia e inductancia producida por la estructura del interconector, etcétera.

Para describir de manera general la tecnología actual usada en un CI, la Fig. 1 [1] muestra un tipo de interconector con base en nanotubos de carbono (CNT, por sus siglas en inglés). La tecnología actual de fabricación implementa vías transversales de silicio (TSV por *Through-Silicon Vias*) en 3 dimensiones (3D) para conectar diferentes capas de transistores distribuidos en todo el volumen en los CI. En otras palabras, una TSV es un interconector vertical que "cruza o atraviesa" el silicio para conectar a dos segmentos diferentes de un CI.

En los últimos años, la implementación de los CNT ha constituido una de las nuevas alternativas para la fabricación de dispositivos, por ejemplo, diodos los cuales mostraron un mejor desempeño en altas frecuencias que los tradicionales de silicio [4]. En interconectores, se ha encontrado que ciertos arreglos de CNT presentan menor retraso en la señal en comparación con interconectores de la misma longitud fabricados con cobre [5], además esta mejora en el retraso de la señal puede mantenerse en altas frecuencias y ha sido documentada en trabajos donde se implementan interconectores con base de CNT en CI de osciladores [6], [7].

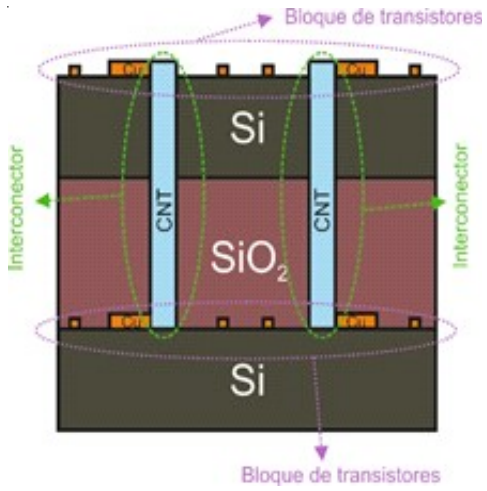


Fig. 1. Vista transversal de un CI (por ejemplo, un microprocesador) compuesto por 2 bloques de transistores los cuales se comunican mediante 2 interconectores a base de CNT que se implementan en TSV. Imagen adecuada de [1].

En contraste con los interconectores de cobre, los interconectores con base de CNT ofrecen, a la misma escala de implementación, ventajas en resistividad (mucho menor debido a su capacidad de transporte cuasi-balístico), mayor tolerancia electromagnética y mayor conductividad térmica [5], [8].

Algunos métodos de transmisión de datos hacen uso de anchos de banda en el orden de los GHz [9], aunado a esto, actualmente hay pocos estudios sobre modelos de interconectores con base en CNT que describan su comportamiento en altas frecuencias [10], [11]. Es por ello que en este artículo se retomarán, en la sección 2 algunas de las características en los CNT reportadas en altas frecuencias, así como posibles aplicaciones de los CNT. En la sección 3 se retoma un modelo RLC propuesto, así como valores planteados para cada elemento. Después, en la sección 4 se describe, mediante la simulación del modelo presentado en la sección 3, el comportamiento de un interconector con base en CNT de altas frecuencias (<100 GHz) así como la optimización del mismo para la obtención de valores similares a los valores medidos. Por último, la sección 5 engloba de manera general algunos de los retos a enfrentar cuando se fabrican dispositivos que implementan CNT.

2. Estado del arte de los interconectores en alta frecuencia a base de CNT

El transporte de electrones en CNT metálicos fue caracterizado en [12], tanto en ambiente dinámico como en estático. Se reveló, que en los CNT metálicos la conductancia en DC (Co-

rriente Directa o *Direct Current*) es aproximadamente igual a la conductancia en AC (Corriente Alterna o *Alternating Current*), al menos en un 50% del rango estudiado (DC a 10 GHz). Los 2 dispositivos utilizados (A y B) para llegar a la conclusión de éste estudio consistían de dos contactos metálicos conectados por medio de un CNT de pared simple (SWCNT) de diferentes longitudes para cada uno (1 µm para el dispositivo A y 25 µm para el dispositivo B). En la Fig. 2 se muestran las conductancias obtenidas en ambos dispositivos [12]. El propósito fundamental de este estudio fue demostrar que a través de 1 CNT se pueden transmitir señales, así como estimar el comportamiento de la impedancia al aumentar la frecuencia.

Un factor importante en la aplicación en altas frecuencias es la inductancia cinética de los CNT, debido a que esta propiedad aminora el efecto pelicular (en comparación con interconectores a base de Cu) en frecuencias contiguas a las decenas de gigahertz, tal como se menciona en [13]. La inductancia cinética se puede definir como el exceso de energía cinética en los electrones del CNT. Por otro lado, el efecto pelicular es aquel que se produce cuándo corrientes alternas de altas frecuencias transitan por un conductor, dichas corrientes tienden a circular únicamente por la superficie de los mismos, incrementando esta tendencia en altas frecuencias, produciendo que la resistencia en AC aumente y difiera de la resistencia en DC. Para verificar esta propiedad de la inductancia cinética y tomando como base el dispositivo fabricado (guía de onda coplanar) de estructura G-S-G (estructura basada en 3 contactos los cuales se distribuyen de manera tierra-señal-tierra) con arreglo efectivo de un CNT de longitud 20 µm y sin arreglo, en la Fig. 3 se muestra la magnitud de los parámetros S_{11} y S_{21} que se obtuvieron. Los parámetros S son una herramienta necesaria que en los equipos de medición nos indicará el grado de acoplamiento de la señal en los dispositivos, siendo el parámetro S_{11} (coeficiente de reflexión) el que indicará la cantidad de potencia reflejada de la señal que incide en la entrada y siendo el parámetro S_{21} (coeficiente de transmisión) el que denotará la cantidad de potencia que se logra transmitir de la entrada a la salida del dispositivo.

La disminución del efecto pelicular debido a la inductancia cinética se ve reflejado por la mejora de los parámetros S_{11} y S_{21} a medida que la frecuencia es incrementada.

Al final de este artículo se propone que los CNT pueden ser aplicados como interconectores en tecnología de integración a gran escala (VLSI por sus siglas en inglés) o como inductores "on-chip".

El comportamiento de películas de grosores de 25 nm - 60 nm de CNT metálicos fue el principal objetivo a estudiar de ma-

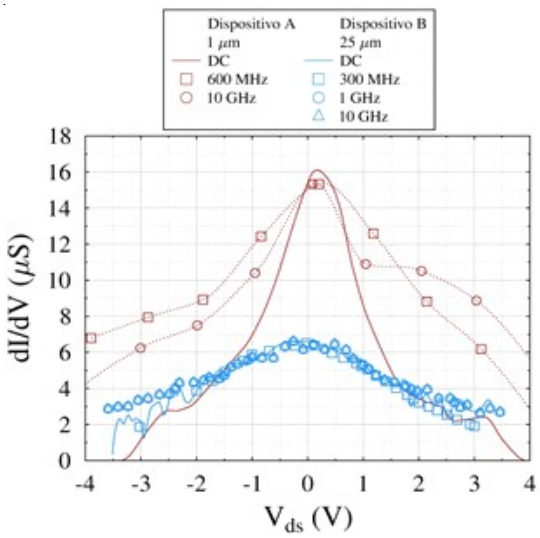


Fig. 2. Conductancia en AC y DC del dispositivo (A) con un SWCNT metálico de longitud 1 µm y del dispositivo (B) con un SWCNT metálico de longitud 25 µm. Datos tomados de [12].

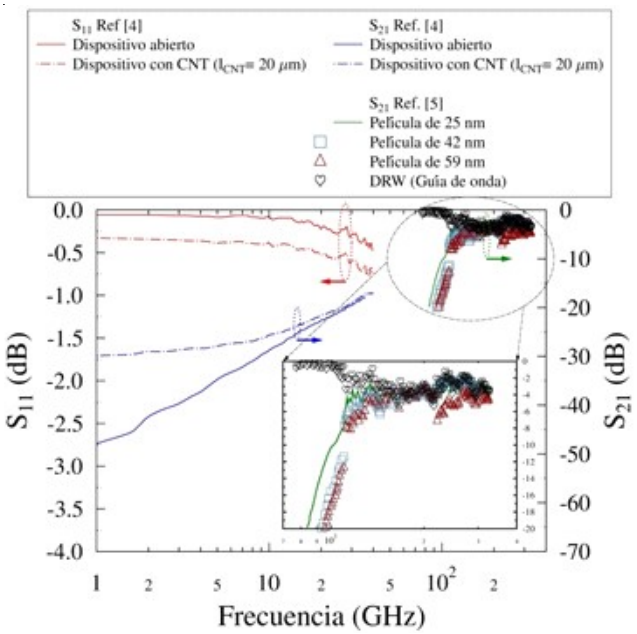


Fig. 3. Magnitudes de los parámetros medidos S_{11} y S_{21} para la guía de onda coplanar propuesta en [13] con y sin CNT. Magnitudes del parámetro medido S_{21} para diferentes grosores de películas de CNT puestas en una guía de onda propuesta en [14]. Datos tomados de [13] y [14] respectivamente.

nera experimental mediante el uso de una guía de onda dieléctrica en [14], para un rango de frecuencias de estudio de 75 a 320 GHz. Aunque ambos tipos de CNT (metálicos y semiconductores) se implementaron en las películas, las contribuciones de los CNT semiconductores fueron despreciadas en los cálculos. En la Fig. 3 se pueden apreciar los datos del parámetro S_{21} obtenidos de las películas delgadas colocadas en la guía de onda coplanar y medidas por un VNA (Analizador de Redes vectorial por sus siglas en inglés). Se observa que debido al cambio de calibración hecho para la configuración de los diferentes accesos de la guía de onda (modelos WR-XX) existe una diferencia abrupta en los valores medidos del parámetro S_{21}. Así mismo, se percibió que dichas pérdidas (por transmisión) disminuyen al incrementar la frecuencia. Otra aplicación de estas películas de CNT es como atenuadores para frecuencias menores a 90 GHz.

La factibilidad de utilizar arreglos de CNT (modelo CG-200 de southwest technology) como interconectores para circuitos tipo *flip-chip* se expone en [15], así como su desempeño en comparación con los interconectores con base de oro. En la Fig. 4 [15] se muestran los parámetros *S* obtenidos en este artículo, se puede distinguir que el coeficiente de transmisión disminuye a mayores frecuencias. Los interconectores a base de CNT entre el dispositivo "Flip-chip" mostraron tener mayores pérdidas por inserción que los interconectores con base de oro debido a la resistencia de los CNT, sin embargo, estas pérdidas por inserción son ligeramente mayores (en 0.3 dB) a las del oro, sin mencionar que potencialmente en altas frecuencias dichas pérdidas pueden ser menores debido a la inductancia cinética de los CNT que aminorará el efecto pelicular [15].

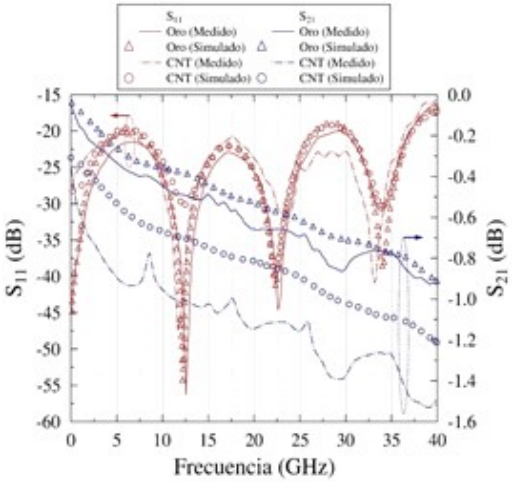


Fig. 4. Parámetros *S* del circuito flip-chip utilizando como interconectores oro/CNT. Datos tomados de [15].

Los interconectores con base en CNT ofrecieron pérdidas por retorno (coeficiente de reflexión o parámetro S_{11}) mejores a 15 dB hasta 40 GHz y pérdidas por inserción (coeficiente de transmisión o parámetro S_{21}) aproximadamente 0.3 dB mayores a las del oro convencional, convirtiéndolos en un material con desempeño similar al oro.

Una investigación teórica sobre el impacto de la concentración de CNT metálicos (el estudio abarcó desde una fracción metálica o F_m = 1/3 de CNT metálicos del total del arreglo, hasta todo el arreglo) en arreglos implementados en altas frecuencias es presentada en [16]. En la Fig. 5 [16] se muestra la gráfica de la profundidad de penetración del efecto pelicular a diferentes frecuencias utilizando la ecuación de la onda viajera (ecuaciones de Maxwell). Como se observa en la Fig. 5 dicha investigación revela que el efecto pelicular en los arreglos de CNT de multipared, o mejor conocidos por su abreviatura en inglés MWCNT, es significativamente reducido en altas frecuencias (especialmente en frecuencias mayores a 50 GHz) en comparación con CNT de pared simple (SWCNT metálicos y semiconductores) e inclusive conductores de cobre convencionales, lo que se traduciría en valores de impedancia menores y constantes de un interconector en aplicaciones en altas frecuencias.

El desempeño eléctrico de una vía transversal de silicio (TSV) compuesta por CNT puede verse afectado por la variación de la inductancia cinética en el canal y degradar la conductividad en altas frecuencias, por ello la conductividad eléctrica de una TSV compuesta por CNT puede ser mejorada de dos maneras [17]: al depositar cobre en la misma vía o aumentar la cantidad de CNT (que a su vez aumentará el F_{CNT} o la cantidad

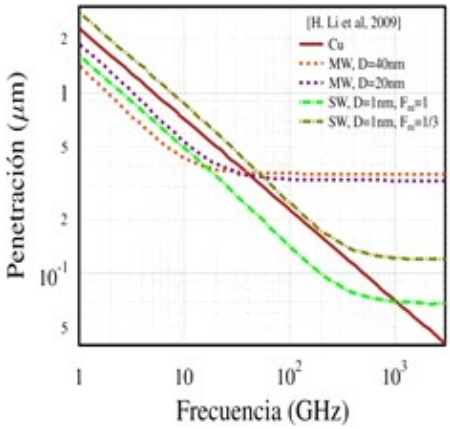


Fig. 5. Profundidad de penetración del efecto pelicular en diferentes tipos de CNT, así como en Cu, en función de la frecuencia. Datos tomados de [16].

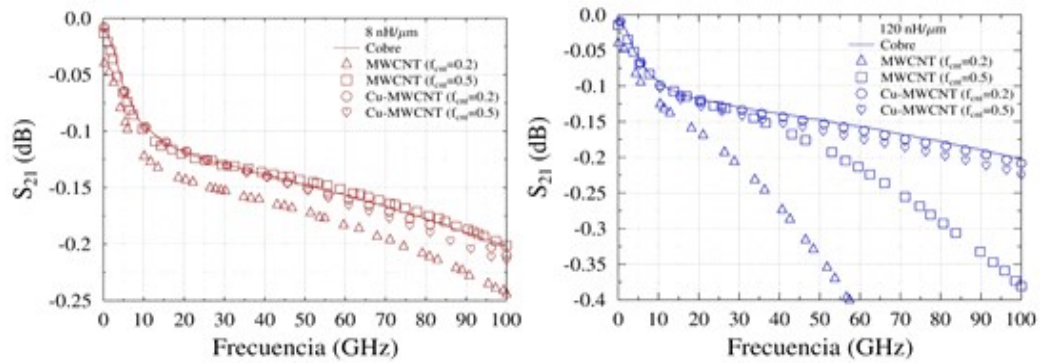


Fig. 6. Coeficiente de transmisión S_{21} para un par de MWCNT y Cu-MWCNT embebidos en vías transversales de silicio con impedancias cinéticas por canal definidas. Datos tomados de [17].

de CNT embebidos). En la Fig. 8 [17] se puede observar como el coeficiente de transmisión (S_{21}) de un par de MWCNT y Cu-MWCNT embebidos en TSV mejora y se vuelve cercano al comportamiento de una TSV de cobre al incrementar la cantidad de CNT que se embeben en ella o bien al añadir cobre a la TSV junto a los CNT .Los valores de inductancia propuestos fueron retomados de dos reportes (no mencionados aquí) los cuales sugieren como límite inferior la inductancia cinética producida por un solo canal que es aproximada a 8 nH/μm y como límite superior 120 nH/μm que es el punto reportado donde el desempeño de los arreglos de CNT se empieza a volver impredecible.

En conclusión, con todas las propiedades descritas en esta sección, los CNT serán candidatos a ser inteconectores por ofrecer pérdidas por retorno (coeficiente de reflexión o S_{11}) y pérdidas por inserción (S_{21} o coeficiente de transmisión) casi iguales que las del oro convencional. Serán factibles cuando las frecuencias a utilizar sean mayores a 50 GHz, pueden de igual forma, usarse como atenuadores a frecuencias menores de 90 GHz, tomando en cuenta una pureza del arreglo de los CNT del 100% (o fracción metálica $F_m = 1$). Sin embargo, mejores resultados de desempeño en altas frecuencias y menor penetración del efecto pelicular pueden ser alcanzados con arreglos de MWCNT y este a su vez usando como interconectores TSV con una cantidad considerable de MWCNT embebidos (F_{CNT}) o con cobre en la misma vía (Cu-MWCNT). Un estudio detallado de estas estructuras queda fuera del enfoque de este artículo, sin embargo, el lector interesado en ellas puede consultar [22].

3. Modelo compacto y extracción de valores para cada uno de sus elementos

A continuación, se describirá la metodología usada en [13] para la obtención de un modelo que describa el comportamiento en altas frecuencias de un interconector con base en CNT, tomando como premisa la deducción de un circuito eléctrico RLC equivalente.

Tal como se citó en la sección 2, un factor importante a tomar en cuenta para la fabricación o modelado de un interconector con base en CNT es la inductancia cinética. El primer paso realizado en [13] fue calcular teóricamente la inductancia cinética y la contribución de esta a la inductancia total del arreglo. Para esta estimación tomaron en cuenta un arreglo de MWCNT con N elementos, con un diámetro promedio de 7.5 nm por MWCNT, un largo del arreglo de 10 μm y un ancho del arreglo 3.5 μm.

Para el cálculo de la inductancia cinética del CNT en el arreglo tomaron en cuenta lo siguiente: cuando la longitud del CNT es mayor a la trayectoria libre media (MFP por sus siglas en inglés) del electrón, la inductancia cinética será proporcional a la longitud del CNT e inversamente proporcional al número de CNT en paralelo, así como se muestra en la ecuación (1) [16]:

$$L_{K_{CNT}} = \frac{L_K}{N} \times l \tag{1}$$

Donde, $L_{K_{CNT}}$ es la inductancia cinética producida por el arreglo de CNT, l es la longitud del arreglo, N es el número de CNT en el arreglo y L_K es la inductancia cinética por unidad de longitud, la cual es aproximada a 8 nH/μm [16]. Cabe resaltar que, aunque no hacen mención del valor de N, aluden que fue estimado mediante el uso de un modelo preestablecido, el cual no es discutido en el presente artículo.

Por otro lado, para estimar la inductancia total (L_{ToT}) del arreglo utilizaron un circuito equivalente de elementos parciales (tampoco estudiado en el presente artículo), descubriendo que el 98.3 % de la inductancia total del arreglo es generada de la inductancia cinética del arreglo de CNT ($L_{K_{CNT}}$). Conclu-

yeron que la inductancia total del dispositivo por fabricar será en gran parte a la contribución hecha por la inductancia cinética.

El siguiente paso que realizaron fue fabricar diferentes dispositivos (guías de onda coplanares) con CNT de longitudes efectivas (o longitudes teóricas dado que en la implementación no se tiene un control sobre el tamaño exacto de los CNT) diferentes de 10, 20 y 30 μm, sin mencionar los dispositivos abiertos (sin CNT) fabricados que utilizaron para desembeber parámetros parásitos. Los dispositivos que elaboraron fueron caracterizados en corriente directa (DC) y en frecuencia (RF).

Para lograr caracterizar dichos dispositivos en corriente directa (DC) aplicaron un voltaje de –1 a 1 V entre las terminales de 3 de los diferentes dispositivos fabricados (guías de onda coplanares) con CNT de longitudes efectivas diferentes (10, 20 y 30 μm) para medir las resistencias diferenciales totales ($R_{ToT} = R_C + R_{CNT} \sim R_{DC}$) de cada uno. Midieron de 3 a 10 muestras de resistencia para cada dispositivo y con los valores promedio para cada arreglo bosquejaron la ecuación (2) [13] la cual describe los valores posibles que pudiera tomar R_{ToT} para diferentes longitudes efectivas en el arreglo de CNT,

$$R_{DC} = (1267.9 \pm 1.482)\Omega + (90 \pm 8.4)\Omega / \mu m \cdot l_{CNT} \quad (2)$$

Gracias a la ecuación (2) se pueden distinguir 2 diferentes componentes en resistencia: uno que se mantiene constante y otro que variará por la longitud de los CNT, en otras palabras, se podrá decir que la primera parte de la ecuación (2) $(1267.9 \pm 148.2)\Omega$ es producida por el contacto entre los CNT y el contacto del dispositivo (R_C), mientras que la segunda parte de la ecuación (2) $(90 \pm 8.4)\Omega / \mu m \cdot l_{CNT}$ es producida meramente por la longitud de los CNT (R_{CNT}). La fluctuación de valores posibles en R_{DC} es debido a que ésta varía en voltajes de polarización $V > 0.4$ V, estimando de esta manera un valor máximo de voltaje el cual ayudo para la caracterización en frecuencia.

Para la caracterización en frecuencia (RF) midieron la magnitud de la impedancia total del dispositivo con CNT de longitud efectiva de 20μm, luego mediante métodos de desembebido (no mencionados en este artículo, aunque se intuye que fue mediante la medición del dispositivo abierto con longitud de 20μm) eliminaron los componentes parásitos (provenientes del pad) de la impedancia. Con la impedancia obtenida propusieron un circuito RLC (véase Fig. 7) y valores de cada uno de sus componentes, para simular el circuito por medio del software de diseño electrónico *Advance Design System* (ADS) y obtener una impedancia, la cual se ajustará a la impedancia medida. Los valores que consideraron para la

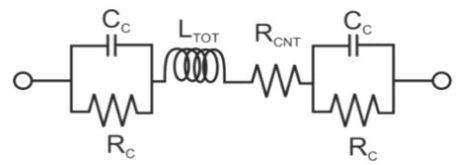


Fig. 7. Circuito eléctrico equivalente RLC propuesto para un arreglo de CNT. Circuito tomado de [13].

implementación en ADS para una guía de onda coplanar de 20μm de largo, se muestran en la Tabla 1 [13].

Retomando los componentes del circuito RLC de la Fig. 2, R_C y C_C son las resistencias y capacitancias producidas por la R_{CNT} es la resistencia producida por el CNT y L_{ToT} es la inductancia total del dispositivo.

Para la obtención de L_{ToT}, la cual como demostraron es mayoritariamente la inductancia cinética del arreglo de CNT, hicieron un procedimiento análogo al del cálculo de la resistencia (utilizando las guías de onda coplanares con diferentes longitudes de CNT se estimaron los valores, se tomaron muestras y se calcularon los valores de inductancias) y se obtuvo la ecuación (3) [13]:

$$L_{ToT} = (-0.05 \pm 0.12)\text{nH} + (0.105 \pm 0.005)\text{nH} / \mu m \cdot l_{CNT} \quad (3)$$

Para finalizar, cabe señalar que el valor de la capacitancia C_C fue estimado puramente por medio de los valores medidos de impedancia y sus métodos de desembebido.

4. Estudio y simulación en altas frecuencias del modelo compacto

Haciendo uso de los datos proporcionados de la Tabla 1 y con el circuito eléctrico equivalente (véase Fig. 7), se obtuvo la ecuación general de impedancia (no proporcionada en [13]) para el modelo propuesto en [13]. El resultado de haber aplicado las leyes de Kirchhoff al circuito RLC es la ecuación propuesta (4):

$$z_{tot} = R_{CNT} + \frac{2R_c}{1 + R_C^2\omega^2 C_C^2} + j\omega[L_{tot} - \frac{2R_C^2 C_C}{1 + R_C^2\omega^2 C_C^2}] \quad (4)$$

Tabla 1. Valores de los parámetros del modelo RLC para un arreglo de MWCNT de 20μm de largo (datos tomados de [13]).

Parámetros	Rc (Ω)	Cc (fF)	R_{CNT} (Ω)	L_{ToT} (nH)
Valores	375	228	1770	2.2

La ecuación (4) brinda una descripción del comportamiento en frecuencia de la impedancia total del interconector con base en CNT, la cual utiliza como parámetros valores que pueden ser conocidos por medio de las ecuaciones (1), (2) y (3), sencillamente sabiendo la longitud del arreglo de CNT que fungirán como interconector.

Uno de los motivos para el cálculo de una función de impedancia descriptiva del dispositivo en función de la frecuencia. es analizar a detalle el circuito presentado en la Fig. 7 y observar conductas que con la sola implementación en un software de modelado y simulación (como lo es ADS) no se podrían percibir en primera instancia, por ejemplo, observamos en la ecuación (4) que en altas frecuencias la impedancia que predominará en el dispositivo será la producida por los CNT. Para validar la veracidad de la ecuación (4) que se propone en el presente artículo se realizó una comparativa con los valores de impedancia reportados en [13] y con el software de diseño electrónico (ADS), graficando las impedancias en un solo plano y utilizando como referencia los valores de cada componente dados en la Tabla 1, tal como se muestra en la Fig. 8.

Gracias a la Fig. 8 se corroboró que la ecuación (4) puede describir de manera precisa el comportamiento de impedancia del dispositivo en altas frecuencias, sin embargo, indagaremos más sobre las características de dicha impedancia para lograr entender la fenomenología detrás de este dispositivo. La parte real e imaginaria de la impedancia del dispositivo fueron separadas y graficadas tal como se muestra en la Fig. 9.

Mediante la Fig. 9 se pueden observar los 2 comportamientos distintos que rigen la impedancia total: del lado de la parte

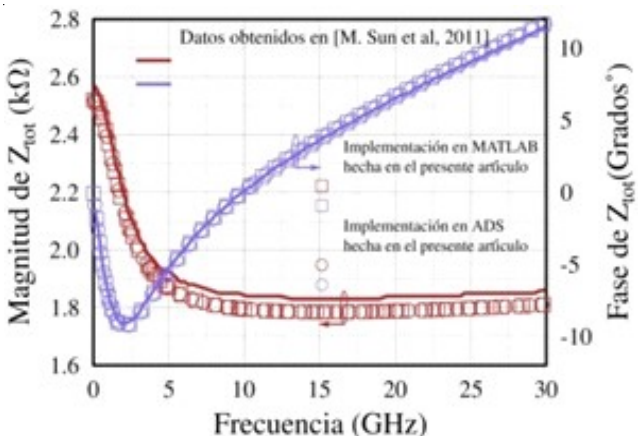


Fig. 8. Comparación entre valores de impedancia obtenidos con la ecuación propuesta (4), implementado ADS y MATLAB contra los v alores reportados en [13].

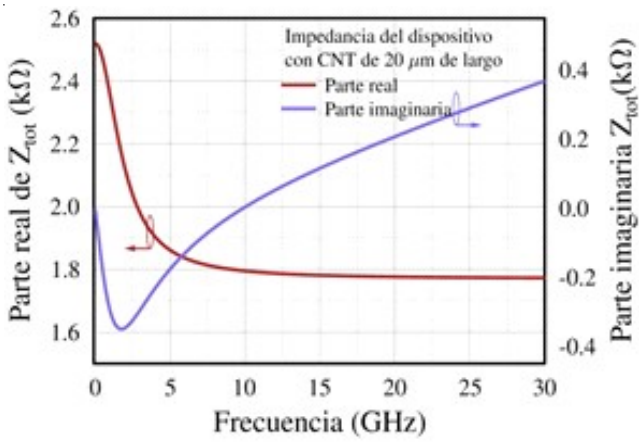


Fig. 9. Comportamiento de la parte real e imaginaria de la impedancia del dispositivo.

real y de la parte imaginaria del dispositivo. Para el caso de la parte real, se observa que el dispositivo al inicio (frecuencias < 10 GHz) presentará una resistencia de mayor magnitud, producida por el proceso de acoplamiento resistivo entre los contactos del dispositivo y el CNT, que su resistencia final (después del acoplamiento o a frecuencias > 10 GHz), además dicha resistencia final se mantendrá constate y estará definida en su mayoría por el CNT y su longitud. Para el caso de la parte imaginaria de la impedancia (reactancia) se observa que adquiere valores negativos a frecuencias menores a 10 GHz (al igual que su contraparte real) lo que indica un proceso de acoplamiento capacitivo entre los contactos y el CNT, para después incrementar debido a la inductancia cinética producida por el CNT.

Para seguir complementando el estudio realizado en [13], se propusieron valores de longitud de arreglos de CNT con largos de 10, 20, 30 y 40 μm hasta frecuencias aproximadas a los 500 GHz y utilizando las ecuaciones (2), (3) y (4) se estimó el valor de las impedancias características para cada interconector. Cabe recalcar que en [13] solamente se trabajó en la longitud efectiva del arreglo de 20 μm para el cálculo de la impedancia total, sin mencionar que el estudio en frecuencias que se hace solo abarcó hasta los 30 GHz como ya se había observado anteriormente en la Fig. 8.

En la Fig. 10 se hizo una comparativa del comportamiento en frecuencia de los valores de impedancia para diferentes largos de CNT, anexando además el de un interconector a base de cobre [16] de 500 μm de largo con dimensiones 2X1 μm.

Se observa en la Fig. 10 que el interconector con un largo de 10 μm es el que menor impedancia generará y no solo eso, es

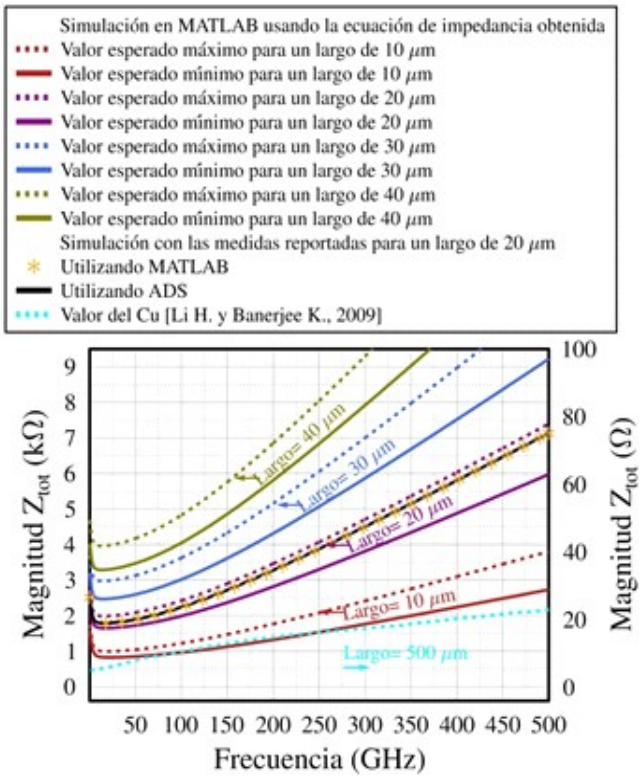


Fig. 10. Comportamiento en frecuencia de la impedancia producida por diferentes longitudes de CNT en un dispositivo contra la impedancia producida por el cobre [16] con medidas 2 x 1 μm.

el que menos incrementará su magnitud de impedancia en altas frecuencias, por tanto, y acorde al modelo propuesto en [13], si se desea implementar un interconector con base en CNT deberá ser a longitudes <<10 μm. Por otro lado, el comportamiento de la impedancia total de un interconector de cobre tenderá a subir conforme aumente la frecuencia, mientras que el del CNT primero tenderá a bajar (mientras se acopla los contactos del dispositivo con los CNT), mantenerse constante (después de haber alcanzado el acoplamiento) y por último volver a subir (debido al ligero pero constante incremento producido por la inductancia), inclusive rebasando sus valores de impedancia inicial.

Para definir el comportamiento de las impedancias obtenidas se separaron (como se hizo en el análisis de la Fig. 9) en sus respectivas partes reales e imaginarias, se graficaron y se interpretaron los valores obtenidos.

Como se puede apreciar en la Fig. 11 el comportamiento en altas frecuencias de la parte real de la impedancia del dispositivo indica la ya antes mencionada resistencia de acoplamiento en bajas frecuencias (<10 GHz) y después de alcanzada su frecuencia de acoplamiento se percibe que el valor se mantiene constante y no solo eso, también dicho valor final constante alcanzado está definido por el largo del CNT, es decir, se corrobora que a mayor longitud del CNT la impedancia del dispositivo será mayor.

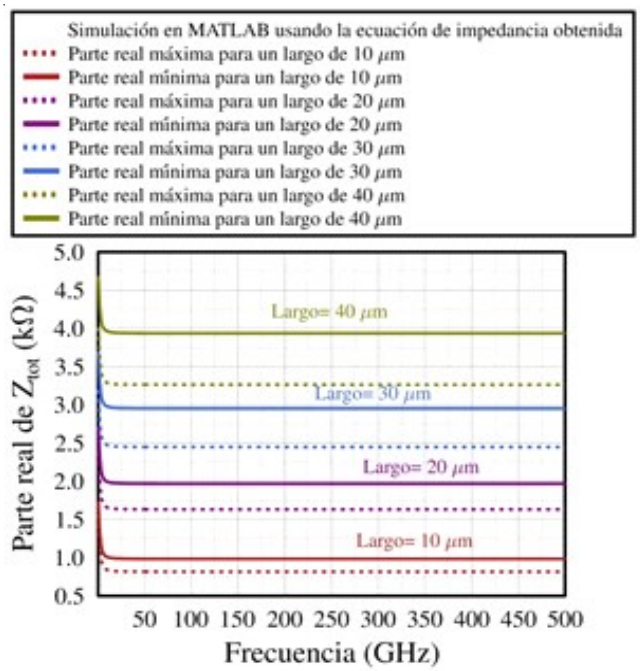


Fig. 11. Comportamiento en frecuencia de la parte real de la impedancia producida por diferentes longitudes de CNT.

Por otro lado, como se distingue en el comportamiento en altas frecuencias en la Fig. 12 de la parte imaginaria de la impedancia del dispositivo, aparece una frecuencia de acoplamiento la cual al ser alcanzada produce un aumento gradual en la impedancia (por la inductancia cinética), además dicho incremento logra impedancias mucho mayores que las de la parte real. También se concluye que la parte imaginaria contribuye en gran medida a la impedancia total del dispositivo.

Como ejercicio y poder bosquejar de manera sencilla el impacto de la correcta implementación de los CNT se grafica en la Fig. 13 la impedancia del dispositivo sin tomar en cuenta las contribuciones por el acoplamiento entre los contactos (resistencia y acoplamiento) y CNT, es decir, se encuentra acoplado ($R_C = 50\ \Omega$ y $C_C = 0$) el dispositivo y el CNT.

Se descubre que al acoplar los contactos del dispositivo con el CNT se obtiene una conducta muy parecida a la del interconector de cobre convencional.

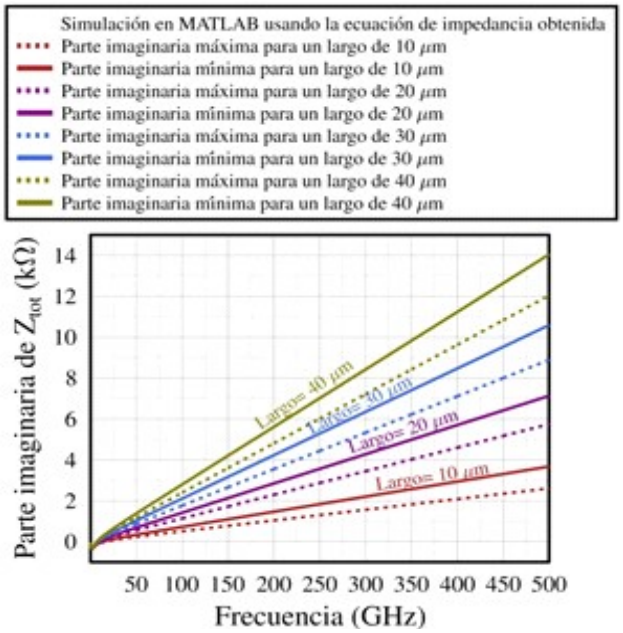


Fig. 12. Comportamiento en frecuencia de la parte real de la impedancia producida por diferentes longitudes de CNT.

Después, mediante ADS y utilizando el circuito de la Fig. 7 se simularon los parámetros S de un interconector de CNT con longitud 20 μm y se compararon con los parámetros *S* reportados en [13] tal como se muestra en la Fig. 14.

Podemos advertir en la Fig. 14 que los valores reportados en [13] de los parámetros *S* con los simulados en ADS son parecidos, sin embargo, dicha discrepancia de valores pudiera ser producida por defectos del dispositivo, por ejemplo y como se menciona en [13], solo unos cuantos CNT hacen contacto con el pad. Otro efecto mencionado que probablemente afectó las mediciones de los parámetros *S*, también mencionado en [13], sea la dominancia de la capacitancia de acoplamiento del arreglo en altas frecuencias.

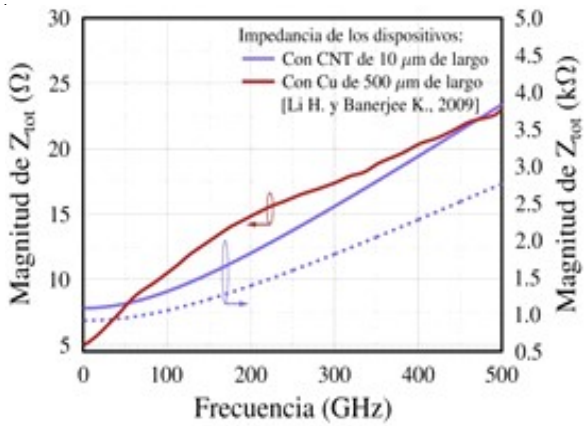


Fig. 13. Comportamiento en frecuencia de la impedancia producida por un CNT acoplado con el dispositivo contra la impedancia producida por el cobre [16] con medidas 2 x 1 μm.

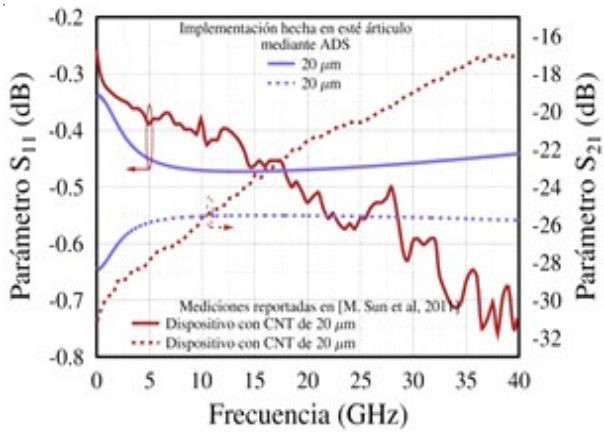


Fig. 14. Comparación del comportamiento en frecuencia de los parámetros S simulados en ADS y medidos en el dispositivo [13].

Debido a la discrepancia de los valores de los parámetros *S* obtenidos mediante el software de diseño electrónico (ADS) y los mostrados en [13], será necesario deducir las ecuaciones que rigen los comportamientos de los parámetros *S* en altas frecuencias y determinar el valor real de los componentes del circuito RLC.

Primero, utilizando el circuito de la Fig. 7 se agrupan los componentes en 3 bloques generales obteniendo impedancias equivalentes. El primer bloque de impedancia equivalente es producido por el acoplamiento entre el CNT y los contactos del dispositivo y está dada por los valores de R_C y C_C tal como se muestra en la ecuación (5):

$$Z_C = \frac{R_C - R_C^2 j\omega C_C}{1 + R_C^2 \omega^2 C_C^2} \tag{5}$$

El segundo bloque se compone de la contribución de impedancia producida meramente por el CNT, tal como se muestra en (6):

$$Z_{CNT} = R_{CNT} + j\omega L_{ToT} \tag{6}$$

El tercer y último bloque de impedancia del circuito es de nuevo producido por el acoplamiento entre el CNT y los contactos del dispositivo, por tanto, está dado por la ecuación (5). Cabe destacar que la suma de los valores de $2Z_C$ y Z_{CNT} da como resultado el valor de Z_{ToT} (ecuación 4).

Con el uso de los bloques de impedancias y sus respectivas ecuaciones (5) y (6) se simplificará el análisis del circuito. Al tener un circuito compuesto únicamente por 3 impedancias en serie se hará uso de los parámetros *ABCD* (de transmisión) dadas las siguientes 3 circunstancias: al ser un circuito pasivo se considerará como recíproco, por ello la relación $AD - BC = 1$[18] de los parámetros se cumplirá. No tendrá ganancia de entrada-salida o salida-entrada (será simétrico) dado que los elementos son pasivos, sin mencionar que además la posición de los componentes y sus valores de circuito son los mismos en ambos puertos, por tanto, existe una relación $A = D$ [18] de los parámetros de transmisión. Es sencillo el análisis usando los parámetros *ABCD* por la topología del circuito.

A continuación, la ecuación (7) describe el comportamiento del parámetro *A*:

$$[A] = [Z_{CNT} + 2Z_C] \tag{7}$$

el comportamiento del parámetro *B* estará definido por la ecuación (8):

$$[B] = [Z_{CNT} + 2Z_C]^2 - 1 \tag{8}$$

el parámetro *D* se calculará de la misma forma del parámetro *A* (dado a su simetría mencionada) tal como se ve en la ecuación (9):

$$[D] = [Z_{CNT} + 2Z_C] \tag{9}$$

y, por último, el parámetro *C* el cual estará dado por la ecuación (10):

$$[C] = [1] \tag{10}$$

Con los valores de cada uno de los elementos de la matriz *ABCD*, se normalizan los valores de *ABCD* tomando en cuenta una impedancia de carga y una impedancia de la fuente de 50 Ω (la fuente y la carga están acopladas al dispositivo) y utilizando las ecuaciones de equivalencia a parámetros *S* [18] (no discutidas en esté artículo) se calculan los parámetros *S*. Para el parámetro S_{11} la ecuación (11) define su comportamiento en altas frecuencias y está dada por:

$$S_{11} = \frac{[Z_{CNT} + 2Z_C]^2 - 2501}{[Z_{CNT} + 2Z_C]^2 + 100[Z_{CNT} + 2Z_C] + 2499} \tag{11}$$

Tabla 2. Valores de los parámetros del modelo RLC propuestos para la optimización de los parámetros *S*.

Parámetros	Rc (Ω)	Cc (fF)	R_{CNT} (Ω)	L_{ToT} (nH)
S_{11}=S_{22}	770	100	900	2.2
S_{21}=S_{12}	1050	90	1770	1.9

mientras que para el parámetro S_{21} la ecuación (12) definirá su comportamiento en altas frecuencias.

$$S_{21} = \frac{100}{[Z_{CNT} + 2Z_C]^2 + 100[Z_{CNT} + 2Z_C] + 2499} \tag{12}$$

Con los parámetros *S* medidos del dispositivo presentados en [13] y manipulando mediante MATLAB los parámetros de las ecuaciones (11) y (12) en valores cercanos a los reportados en la Tabla 1, se logra optimizar el dispositivo, encontrando valores que se proponen en la Tabla 2, los cuales hacen que los parámetros *S* teóricos se asemejen al comportamiento práctico del dispositivo.

Utilizando los valores propuestos en la Tabla 2 y las ecuaciones (11) y (12) se comparan nuevamente los valores de los parámetros *S* con los reportados en [13], tal como se muestra en la Fig. 15.

Se observa en la Fig. 15 que se logra obtener un comportamiento más parecido al reportado prácticamente, también gracias a la Tabla 2 se confirma que los parámetros que más cam-

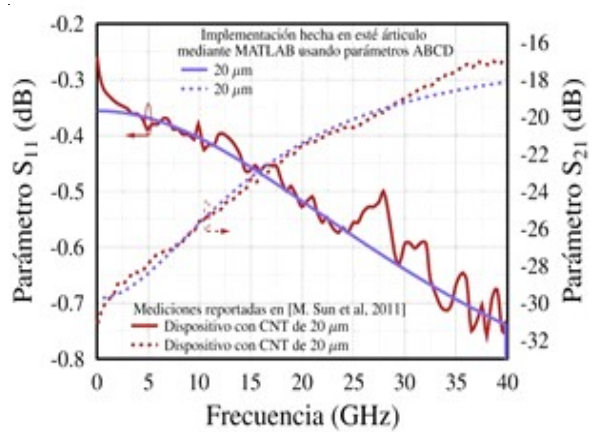


Fig. 15. Comportamiento en frecuencia de los parámetros S medidos en [13] y de los parámetros *S* calculados con las ecuaciones (11) y (12) después de proponer los valores de la Tabla 2 para cada componente del modelo.

biaron en el circuito RLC, tomando como base la Tabla 1, fueron la capacitancia y resistencia de acoplamiento en comparación con la resistencia e inductancia producida por los CNT, confirmando que los defectos de fabricación estarán en los contactos del dispositivo y que todas las ecuaciones calculadas en esté artículo podrán bosquejar el comportamiento de los CNT para este modelo propuesto.

Como conclusión de la sección, se obtuvieron ecuaciones que describen el comportamiento en frecuencia de la impedancia y de los parámetros *S* del modelo propuesto en [13], extendiendo el mismo a frecuencias superiores a 30 GHz. Se analizó la impedancia característica del dispositivo y se concluyó que la parte real (correspondiente a la resistividad) estará dada, en frecuencias menores a 10 GHz, por la resistencia de acoplamiento para pasada esta frecuencia comenzar a disminuir y ser meramente la resistencia del CNT, la cual se mantuvo constante en todo el rango estudiado (1 GHz-500 GHz) y depende de la longitud del CNT. Por otro lado, en la parte imaginaria de la impedancia se descubrió que en frecuencias menores a 10 GHz, la capacitancia producida por el acoplamiento es dominante. A frecuencias mayores a 10 GHz sin embargo, la inductancia producida por los CNT es más significativa. Este fenómeno está ligado directamente a la longitud de los CNT, *i. e*., la parte imaginaria de la impedancia está dominada por reactancias capacitivas o inductivas dependiendo de la frecuencia de trabajo.

Se percibe que al acoplar de manera correcta los contactos del dispositivo con el CNT, se obtendrá un comportamiento cuasi-similar al del cobre.

Se descubrió que el comportamiento de este modelo a frecuencias > 10 GHz tiende a un aumento drástico en la impedancia sobre todo en interconectores >10 μm, por efectos de la parte imaginaria (inductancia de los CNT) tal como se mencionó previamente.

Por último, se optimizó el modelo proponiendo valores para los elementos del circuito RLC los cuales amoldarán los resultados de la ecuación de los parámetros *S* (aquí propuesta) con los valores medidos del dispositivo elaborado en [13]. Se descubrió que los datos para los elementos de acoplamiento eran erróneos y se propusieron nuevos, los cuales sugieren defectos en el acoplamiento entre los contactos y el CNT muy probablemente producidos por procesos de fabricación del dispositivo.

5. Retos tecnológicos

Como se observó en la sección anterior, tener ecuaciones las cuales nos describan el comportamiento en frecuencias del dispositivo, ya sea en impedancia o en parámetros *S*, no nos asegura poder calcular con precisión el valor real y esto no será debido a la veracidad de las ecuaciones (las cuales se pudieron corroborar), sino por una mala estimación de los elementos del modelo RLC debido a fallas en la fabricación del dispositivo que modificaron los valores originales previstos. En el caso de la fabricación de los contactos se ha tratado de reducir dicha resistencia (de acoplamiento) empleado diferentes materiales [19], no obstante, dicha resistencia es un impedimento para lograr mejores desempeños debido a los fenómenos de dispersión que lo envuelven, que a su vez y como su nombre lo indica, afectan a los parámetros *S*.

Por otro lado, la deposición de CNT en un dispositivo también puede llegar a ser una tarea complicada debido a que no se tiene un control de la cantidad de CNT depositados, sin mencionar los problemas que conlleva orientarlos en la dirección deseada. Aunque hay técnicas, como la dielectroforesis [20], que controla la cantidad de CNT depositados (disminuir o aumentar la concentración de CNT en una solución) y orientación (mediante campo eléctrico), dichas técnicas no son factibles si se desea fabricar dispositivos en masa debido al tiempo que se requiere para realizarlas [20], [21].

6. Conclusiones

Se observó en la sección 2 que los CNT se perfilan como candidatos a ser inteconectores por sus propiedades eléctricas (inductancia, impedancia y parámetros de dispersión *S*) en altas frecuencias, además de lograr una correcta implementación (parámetros *S* parecidos a los del oro) como interconectores para circuitos *flip-chip*. Se descubrió también que el desempeño (conductividad eléctrica) de un interconector de CNT puede ser mejorado añadiendo arreglos de MWCNT o utilizando una TSV con CNT embebidos.

Se retomaron los valores para el modelo RLC propuestos en [13] así como las ecuaciones que se obtienen para describir el comportamiento de cada elemento. Con los datos recopilados del modelo, se encontraron las funciones de impedancia característica y parámetros *S*, logrando con la primera reproducir los valores medidos de impedancia y la cual fue parteaguas para extender el análisis en altas frecuencias.

Se comprendió la fenomenología detrás de la componente de la parte real e imaginaria de la función de impedancia. De lado de la parte real se tienen el comportamiento de la resistencia de acoplamiento y de la resistencia del CNT las cuales, en conjunto, muestran un comportamiento constante al aumentar la frecuencia de la señal, mientras que la parte imaginaria corresponde a la capacitancia de acoplamiento y a la inductancia de los CNT.

Con la función característica de impedancia del interconector se establecieron diferentes casos de estudio para diferentes largos (10, 20, 30 y 40 μm) a frecuencias mayores a las reportadas (hasta 500 GHz), descubriendo que la magnitud de la impedancia característica del interconector tiende a aumentar en frecuencias cercanas a los 10 GHz, efecto no reportado antes en el modelo propuesto en [13] y atribuido al acoplamiento entre los contactos del dispositivo y los CNT. Se concluye también, en base en el estudio realizado con el modelo empírico propuesto con anterioridad [13] que la longitud de los CNT en los interconectores es uno de los parámetros que jugará un roll importante, ya que está íntimamente ligado con la impedancia, la cual es una de las características físicas que definen el comportamiento del interconector en altas frecuencia.

Una estimación de los parámetros *S* pudo ser bosquejada por medio de la simulación en ADS, sin embargo, para obtener valores teóricos más fieles a los prácticos fue necesaria la estimación de las ecuaciones características de los parámetros *S* (por medio de parámetros *ABCD*), localizar valores de los parámetros y proponer valores para los elementos del circuito RLC los cuales optimizaron el modelo.

Valores relativamente bajos de impedancia (<1 kΩ) en altas frecuencias podrán ser alcanzados utilizando CNT de largos pequeños (< 10 μm), en otras palabras, como interconectores locales (< 100 μm).

Por último, como trabajo a futuro se propone mejorar el modelo RLC añadiendo nuevos elementos del dispositivo que no se toman en cuenta (capacitancias cuánticas, por ejemplo) y compararlo con otros modelos (que consideren arreglos de CNT o TSV con CNT incrustados) para obtener una visión más amplia de su comportamiento en altas frecuencias.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional, a la Secretaria de Investigación y Posgrado mediante el proyecto SIP-20196137, a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Zacatenco, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado, así como a la Universitat Autonoma de Barcelona por hacer posible esta colaboración.

Referencias

[1] A. Todri-Sanial, A. Maffucci, *Carbon Nanotube for Interconnects. Process, Design and Applications*, Suiza: Springer, 2017, Disponible en: https://www.springer.com/gp/book/9783319297446. Consultado: 24 agosto, 2018.

[2] S. Im, N. Srivastava, K. Banerjee, K. E. Goodson, "Scaling Analysis of Multilevel Interconnect Temperatures for High-Performance ICs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, núm. 12, pp. 2710-2719, 2005.

[3] B. Li, T. D. Sullivan, T. C. Lee, D. Badami, "Reliability challenges for copper interconnects," *Microelectronics Reliability*, vol. 44, núm. 3, pp. 365-380, 2004.

[4] H. Macedo-Zamudio, A. Pacheco-Sanchéz, L. M. Rodríguez-Méndez, E. Ramírez-García, D. Valdéz-Pérez, "Estudio en régimen DC y AC de diodos de nanotubos de carbono para aplicaciones de alta frecuencia," *Científica*, vol. 23, núm. 2, pp. 91 - 98, julio-diciembre , 2019.

[5] K. Koo, H. Cho, P. Kapur, K. C. Saraswat, "Performance Comparisons Between Carbon Nanotubes, Optical, and Cu for Future High-Performance On-Chip Interconnect Applications," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 54, no. 12, pp. 3206 - 3215, November , 2007. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/4383033. Consultado: 29 Agosto, 2018

[6] G. F. Close, S. Yasuda, B. Paul, S. Fujita, H. S. P. Wong, "A 1 GHz Integrated Circuit with Carbon Nanotube Interconnects and Silicon Transistors," *Nano Letters*, vol 8, núm. 2,pp. 706-709, 2008.

[7] X. Chen, D. Akinwande, K-J. Lee, G. F. Close, S. Yasuda, B. C. Paul, S. Fujita, J. Kong, H. S. P. Wong, "Fully integrated graphene and carbon nanotube interconnects for gigahertz high-speed CMOS electronics," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 57, núm. 11, pp. 3137-3143, 2010.

[8] A. Todri-Sanial, R. Ramos, H. Okuno, J. Dijon, A. Dhavamani, M. Wislicenus, K. Lilienthal, B. Uhlig, T. Sadi, V. P. Georigev, A. Asenov, S. M. Amoroso, A. R. Brown, A. Pender, C. Millar, F. Motzfeld, B. Gotsmann, J. Liang, G. Gonçalves, N. Rupesinghe y K. Teo, "A Survey of Carbon Nanotube Interconnects for Energy Efficient Integrated Circuits," *IEEE Circuits and Systems Magazine*, pp. 47-62, 2017.

[9] V. Kravchenko, R. Resendíz-Vázquez, "Estimación del ancho de banda para comunicaciones satelitales tomando en cuenta la dispersión en la ionosfera," *Científica*, vol. 13, núm. 1, pp. 9 - 16, enero-marzo , 2009.

[10] J. J. Plombon, K. P. O'Brien, F. Gstrein, V. M. Dubin, "High-frequency electrical properties of individual and bundled carbon nanotubes," *Applied Physics Letters*, vol. 90, pp. 063-106, 2007.

[11] A. Raychowdhury, K. Roy, "Modeling of Metallic Carbon-Nanotube Interconnects for Circuit Simulations and a Comparison with Cu Interconnects for Scaled Technologies," *IEEE Transactions on Computer- Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, vol. 25, núm. 1, pp. 58-65, 2006.

[12] Z. Yu, P. J. Burke, "Microwave Transport in Metallic Single-Walled Carbon Nanotubes," *Nano Letters*, vol. 5, núm. 7, pp. 1403-1406 , Junio, 2005. [en línea]. Disponible en: https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/nl050738k. Consultado: 5 septiembre, 2018.

[13] M. Sun, Z. Xiao, Y. Chai, Y. Li y P. C. H. Chan, "Inductance Properties of In Situ-Grown Horizontally Aligned Carbon Nanotubes," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 58, núm. 1, pp. 229-235, Enero, 2011. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5628276. Consultado: 10 septiembre, 2018.

[14] I. I. Nefedova, D. V. Lioubtchenko, I. S. Nefedov y A. V. Räisänen, "Conductivity of Carbon Nanotube Layers at Low-Terahertz Frequencies," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 6, núm. 6, pp. 840-845, noviembre, 2016. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7570260. Consultado: 17 septiembre, 2018.

[15] P. Xu, M. C. Hamilton, "Solution-Deposited Carbon Nanotube Flip Chip Interconnect for High-Frequency Applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, núm. 4, pp. 229-231, Abril, 2015. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7045619. Consultado: 19 septiembre, 2018.

[16] H. Li, K. Banerjee, "High-Frequency Analysis of Carbon Nanotube Interconnects and Implications for On-Chip Inductor Design," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 56, núm. 10, pp. 2202-2214, octubre, 2009. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/5238613. Consultado: 23 Septiembre, 2018.

[17] W-S. Zhao, J. Zheng, Y. Hu, S. Sun, G. Wang, L. Dong, L. Yu, L. Sun, W-Y. Yin, "High-Frequency Analysis of Cu-Carbon Nanotube Composite Through-Silicon Vias," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 15, núm. 3, pp. 506-511, mayo, 2016. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7442879. Consultado: 3 octubre, 2018.

[18] D.A. Frickey, " Conversions Between S, 2, Y, h, ABCD, and T Parameters which are Valid for Complex Source and Load Impedances", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 42, núm. 2, pp. 205-211, febrero, 1994. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/275248. Consultado: 5 enero, 2020.

[19] A. A. Vyas, C. Zhou, C. Y. Yang, "On-Chip Interconnect Conductor Materials for End-of-Roadmap Technology Nodes," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 17, núm. 1, pp. 4-10, 2018. [en línea]. Disponible en: https://ieeexplore.ieee.org/document/7765105. Consultado: 5 diciembre, 2019.

[20] X. Wei, L. Pengfei, *Carbon Nanotubes - Synthesis, Characterization, Applications*, Siva Yellampalli (Ed.), 2011. [en línea]. Disponible en: https://www.intechopen.com/books/carbon-nanotubes-synthesis-characterization-applications/dielectrophoretic-deposition-and-alignment-of-carbon-nanotubes. Consultado: 2 junio, 2019.

[21] L. Jia, Y. Zhang, J. Li, C. You, E. Xie, "Aligned single-walled carbon nanotubes by Langmuir-Blodgett technique," *Journal of Applied Physics*, vol. 104, núm. 17, pp. 074318.1-074318.6, agosto, 2008. [en línea]. Disponible en: https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.2996033. Consultado: 12 junio, 2019.

[22] A. Pacheco-Sánchez, I. Larruz-Castillo, D. Sangani, D. Valdez-Perez, "Comprehensive review on high-frequency CNT-based interconnects", *IEEE International Conference on Applied Science and Advanced Technology (iCASAT)*, Querétaro, Mexico, noviembre 2019. doi: https://dor.org.10.1109/iCASAT48251.2019.9069515

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

XML JATS en Redalyc

Redalyc ha emprendido una transición y se suma al estándar XML JATS, bajo la especificación JATS4R, lenguaje de metamarcado con reglas simples, que provee de un método uniforme para describir e intercambiar datos estructurados

xmljatsredalyc.org

REDALYC 3.0

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a05

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 125-133, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Evaluación de sistemas eólicos en el Caribe*

Guillermo **Becerra**[1]
José **Hernández**[2]
Edith **Osorio**[1]
Jorge O. **Aguilar**[2]
Javier **Vazquez**[2]

[1]Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CONACyT-Universidad de Quintana Roo
[2]Universidad de Quintana Roo
División de Ciencias e Ingeniería
Boulevar Bahía s/n, Chetumal, CP 77019, Quintana Roo.
MÉXICO

correos electrónicos (emails):
guillermobec@gmail.com
josherna@uqroo.edu.mx
osoriodelarosa@gmail.com
ovidio@uqroo.edu.mx
jvazquez@uqroo.edu.mx

Recibido 31-01-2020, aceptado 24-03-2020.

Resumen

El crecimiento económico de la población está ligado fuertemente con el consumo de energía, en los últimos años, el mencionado aumento se relacionaba también con las emisiones de CO_2. Hoy en día, la principal transformación de energía se enfoca a la producción de electricidad, sin embargo, la transformación de energía eléctrica, mediante fuentes fósiles ha dejado una huella importante en el planeta. De las principales alternativas en años recientes, se ha dedicado gran potencial a estudiar y aprovechar la energía proveniente del sol, así como el uso del viento que finalmente es una transformación más de la absorción de energía solar. Por otro lado, el uso eficiente de la energía eólica tiene múltiples retos por resolver como fuente de generación eléctrica y, particularmente, en la Universidad de Quintana Roo se estudian diferentes vertientes, para lograr su uso con el mayor provecho de la mencionada fuente de energía limpia. En el presente trabajo se describen algunos modelos para la representación de aerogeneradores, experimentos mediante un túnel de viento con una turbina de viento y el recurso eólico local.

Palabras clave: energía limpia, turbina de viento, túnel de viento, potencia eólica.

Abstract
(Evaluation of Wind Systems in the Caribbean)

Economic growth is strongly linked to energy consumption, as well as to polluting emissions, however the transformation to electricity, through fossil sources, it has left an important mark on the planet. Of the main alternatives in recent years, great potential has been devoted to studying and taking advantage of the energy coming from the sun, as well as the use of wind, which finally is another transformation of the solar energy absorption. On the other hand, the efficient use of wind energy has multiple challenges to solve as a source of electricity generation and, especially at the University of Quintana Roo, different aspects are studied, to achieve its use with the mayor benefit from the aforementioned source of clean energy. In the present work, some models for the representation of wind turbines, experiments through a wind tunnel with an aerogenerator and the local wind resource are presented.

Index terms: clean energy, wind turbine, wind tunnel, wind power.

1. Introducción

La energía que proviene del viento se ha aprovechado desde muchos años atrás. Tradicionalmente se han empleado molinos de viento para obtener energía mecánica, en la antigüedad los principales usos se enfocan al bombeo de agua y molinos de granos. Sin embargo, como se menciona en Chaves [1], en la revolución industrial por la aparición de la máquina de vapor, los molinos de viento pierden importancia, pero desde la crisis del petróleo se retoma y, en general, la industria de la energía eólica se ha centrado en la generación de electricidad a partir de grandes aerogeneradores ubicados en lugares expuestos como: montañas y costas, con velocidades del viento medias altas [2], [3], lo cual, consiste en ofrecer energía renovable a costo competitivo con el mercado.

Como ejemplo principal en México se pueden resaltar los aerogeneradores instalados en el Istmo de Tehuantepec,

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

Oaxaca, donde se han instalado dispositivos de gran escala para la red eléctrica del país [4], [5], [6]. Sin embargo, a nivel mundial existen múltiples instalaciones, de las que se pueden resaltar hasta 2017 [7], los principales productores por región: Sudáfrica 2,094 MW (África), China 188,232 MW (Asia), Alemania 56,132 MW (Europa), Brasil 12,763 MW (Latinoamérica y el Caribe), USA 89,077 MW (Norteamérica); Cabe resaltar que México produce 4,005 MW.

Por otro lado, recientemente, han aumentado los fabricantes de pequeñas turbinas, principalmente para usos particulares. Aunque la definición de sistemas eólicos pequeños generalmente se acepta para incluir cualquier dispositivo con una potencia menor a 50 kW, las turbinas para aplicaciones domésticas generan 2 o 3 kW de potencia. Se pueden montar en techos o postes independientes y generalmente se conectan al tablero de distribución del usuario [8]. La electricidad que se genera puede ser usada directamente en el sitio, y cualquier excedente se ingresa a la red eléctrica. Para alcanzar dichas potencias de generación eléctrica, generalmente son turbinas de arranque con velocidad de viento nominal mayor a 10 m/s instaladas a una altura por arriba de los 10 m sobre el nivel del mar [6].

Por otro lado, en Soler-Bientz *et al*. [9] de 2000 - 2007, para la península de Yucatán, Hernández- Escobedo *et al*. [10] 2000 - 2008, para todo México, reportan las velocidades del viento promedio, donde se puede notar que, para la ciudad de Chetumal, perteneciente al Caribe Mexicano, el promedio mencionado, está por debajo de 5 m/s. Los datos son obtenidos cada 10 minutos por las estaciones meteorológicas respectivas, con los que se calculan los promedios. Sin embargo, algunos estudios cercanos a la región, como el caso de la isla de Cozumel [11], donde se describe la posibilidad de instalación de un sistema eólico en combinación con fotovoltaico, apoyaría la reducción del costo y emisiones de CO_2. Además, en [12], Hernández-Gálvez *et al*. presentan la investigación y caso de estudio para algunos sitios del estado de Tabasco México, donde existe la posibilidad de implementar sistemas eólicos en lugares de bajo recurso, que normalmente se descartan por el costo beneficio.

Por lo que es importante realizar un estudio en el diseño de los aerogeneradores para evaluar y en principio, aprovechar el recurso eólico en sitios donde la velocidad del viento promedia menos de 10 m/s. El presente trabajo hace un análisis de energía eólica en la zona, así como experimentos con un túnel de viento y aerogenerador para determinar su captación de energía.

El resto del documento está organizado de la siguiente forma, en la sección 2 se describen los aspectos teóricos para el modelo del sistema de generación a partir de la energía del viento, la sección 3 describe los sistemas eólicos utilizados para los experimentos y los perfiles del recurso eólico local. La sección 4 describe los experimentos realizados con los mencionados sistemas y la sección 5 finaliza con la discusión y conclusiones del trabajo.

2. Aspectos teóricos del sistema

Del aprovechamiento de energía eólica, que hoy en día se transforma a electricidad, al hacer girar una turbina mediante un ingenioso diseño. En esta sección se presentan algunos modelos matemáticos, para describir el comportamiento de este sistema, que normalmente es empleado en la literatura.

2.1. Potencia eólica-mecánica

Se han empleado diferentes enfoques teóricos para describir la transformación de energía que proviene del viento, algunos de los cuales se describen en [3], [4], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], entre otros.

Donde un modelo usual de potencia (P), en términos del coeficiente de potencia (C_p), que indica la eficiencia de conversión entre la potencia eólica - mecánica del aerogenerador es:

$$P = 0.5\, \rho\, C_p\, (\lambda,\alpha)\, A_R V_v^3 \tag{1}$$

donde ρ es la densidad del aire, A_R el área cubierta por los álabes durante la rotación, V_v la velocidad del viento y

$$C_p = 0.5 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\alpha - 5e \right]^{\frac{-21}{\lambda i}} \tag{2}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\alpha} - \frac{0.35}{\alpha^3 + 1}, \quad \lambda = \frac{R\omega}{V_v} \tag{3}$$

con λ la relación de velocidad de la punta del álabe, α el ángulo de inclinación del álabe, R el radio del álabe, ω la velocidad angular del rotor de la turbina.

Además, la relación general de C_p, para el análisis de aerogenerador o ventilador, puede ser expresada de la forma,

$$C_p = sign\,(\lambda')\, 0.5 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\alpha - 5e \right]^{\frac{-21}{\lambda i}} \tag{4}$$

donde λ' es la velocidad relativa normalizada,

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 125-133, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a05

$$\lambda' = \frac{V_v - r\omega}{V_m} \tag{5}$$

con r como el radio equivalente ($r \neq R$), V_m la velocidad media del viento.

Mediante las ecuaciones anteriores se puede graficar el coeficiente de potencia, con respecto a la velocidad relativa normalizada, para la posibilidad de operación del generador ante diferentes α, (véase Fig. 1).

Por otro lado, en diferentes trabajos [18], [19], [20] se analizan otros detalles de la generación como los efectos del generador eléctrico acoplado y la electrónica de potencia utilizada para regular los efectos variantes.

Con lo que se define la potencia extraíble del viento P_v [kW/m²],

$$P_V = \begin{bmatrix} 0 & V_V < V_{ci} \\ P & V_{ci} \leq V_V < V_n \\ P_n & V_n \leq V_V < V_{cf} \\ 0 & V_{cf} \leq V_V \end{bmatrix} \tag{6}$$

donde P_n es la potencia nominal, V_{ci} la velocidad de arranque (inicial), V_n la velocidad nominal, V_{cf} la velocidad de paro (final). Lo cual capta la energía en un rango de velocidad [21], como se muestra en la Fig. 2, de forma dinámica antes de la nominal.

3. Sistemas eólicos

Se realizaron experimentos con la turbina eólica (Air X 400 W) de wind power Manual AIR-X [21], y el túnel de viento (Subsonic), con los cuales se cuenta en la Universidad de Quintata Roo.

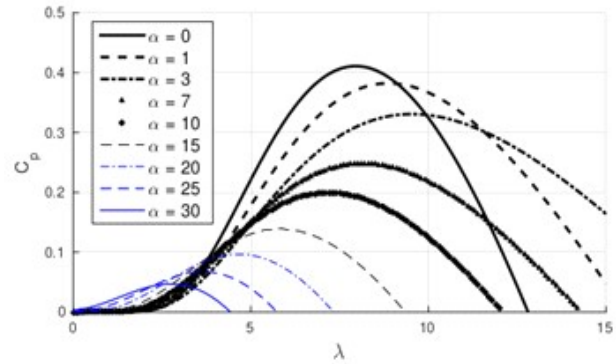


Fig. 1. Curvas características C_p vs λ del aerogenerador

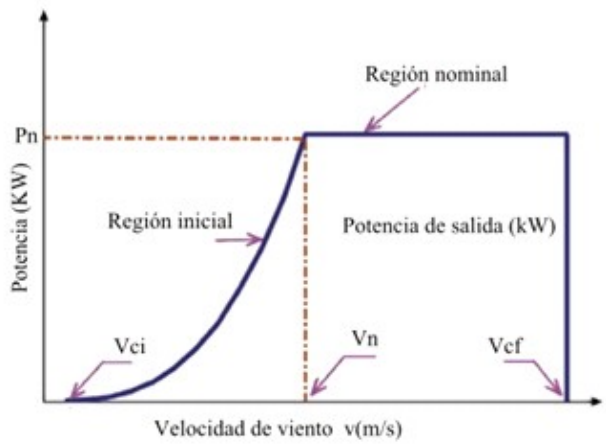


Fig. 2. Curva característica de potencia de turbina de viento.

2. Desarrollo del problema

El túnel de viento subsónico o túnel aerodinámico es una herramienta que se utiliza normalmente en mecánica de fluidos para diferentes experimentos, el cual, tiene la opción de aplicar diferentes velocidades de viento en sistemas a escala tales como edificios, aeronaves, puentes, vehículos, turbinas de viento (como la del presente trabajo), entre otros.

La Fig. 3 muestra el túnel y aerogenerador que se emplearon en el experimento, el aire ingresa por un alisador de flujo de nido de abeja de aluminio (lado izquierdo), diseñado para garantizar que el flujo sea constante tanto en magnitud como en dirección, al continuar, el aire atraviesa la sección de trabajo (ancho 304 mm x alto 304 mm x largo 457 mm) y sale del túnel extraído por un ventilador de 5 álabes, que gira un motor de AC con frecuencia variable, para controlar la velocidad. En el lado derecho de la figura, se aprecia la turbina eólica.

Fig. 3. Montaje del túnel de viento sobre la mesa de trabajo (equipo naranja) y turbina eólica Air X (carcaza blanca, con aspas negras).

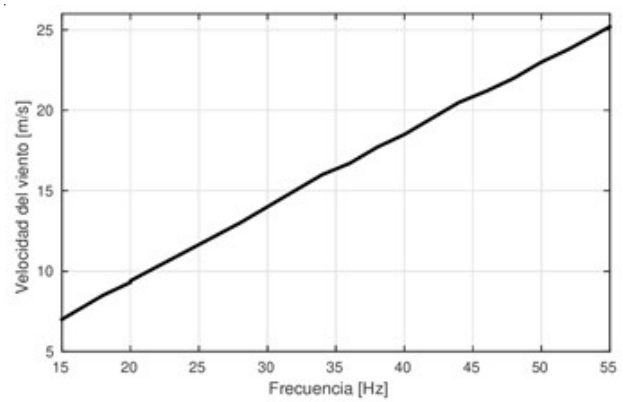


Fig. 4. Incremento de la velocidad del viento en el área de trabajo del túnel de viento, ante incremento de frecuencia en el variador de velocidad del motoventilador.

La Fig. 4 muestra el aumento de frecuencia en el variador de velocidad, para el motor de AC que acciona el ventilador y extrae el viento. Al aumentar la frecuencia, se incrementa la velocidad del viento en el área de trabajo del túnel de viento hasta un valor cercano a los 25 m/s.

Sin embargo, por las dimensiones internas del área de trabajo del túnel (A_T = 0.092 m^2), no es posible ingresar el aerogenerador con área de (A_A = 1.075 m^2), para el experimento con viento homogéneo. Por lo tanto, se experimentó colocando la turbina eólica a 70 cm de distancia en la descarga del túnel, donde se midieron las velocidades de viento a la salida del túnel. Primero se analizó el mapa de velocidades del viento para un radio de 40 cm desde el centro del túnel, para diferentes valores de frecuencia (véase Fig. 5), donde se puede ver que las velocidades del viento son muy diferentes de

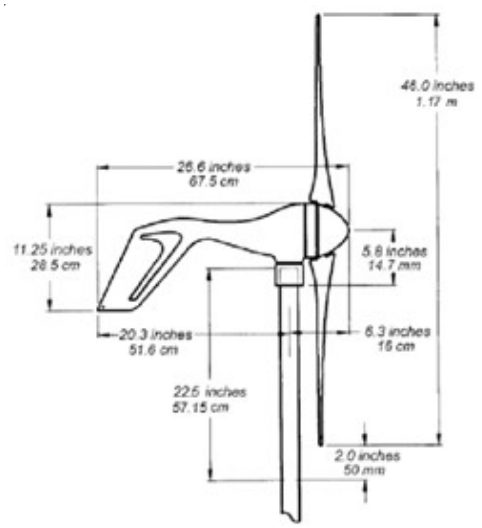


Fig. 6. Dimensiones geométricas del aerogenerador.

acuerdo con el punto elegido y se debe a la descarga del túnel. Además, la orientación del viento ya no se controla, lo que se aproxima a condiciones más reales para los experimentos con la turbina eólica.

3.2. Turbina eólica

De las características principales en cuanto al aerogenerador, de acuerdo con el fabricante, el peso de la turbina es 6 [kg], el área de esta durante la rotación es de 1.075 [m], los detalles geométricos se muestran en la Fig. 6.

La velocidad del viento para el arranque es de 3.0 [m/s] y la nominal de 12 [m/s], lo que sería el punto ideal de operación.

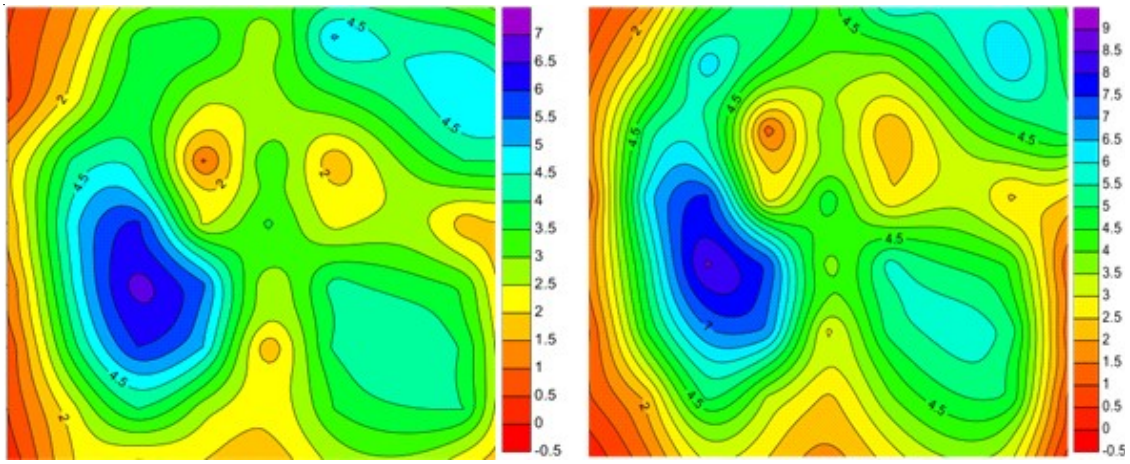


Fig. 5. . Distribución de velocidades de viento en la descarga del túnel de viento, a 70 cm de distancia, para (a) 20 y (b) 25, Hz respectivamente.

La capacidad de captación de la turbina eólica de acuerdo con la velocidad del viento se muestra en la Fig. 7, tomada del manual de operación para la turbina [21]. La velocidad está expresada en millas por hora (mph) y la conversión a (m/s = 0.45 mph).

Las curvas muestran un ancho de banda de potencia para un valor específico de velocidad. La curva inferior es para un perfil de viento ideal y de acuerdo con el nivel de turbulencia del viento, se incrementa hasta la curva superior, según el fabricante. Para la curva inferior se obtiene el máximo nominal de 12 m/s = 28 mph, que produce 400 W.

Al eje se acopla un generador-alternador trifásico de imanes permanentes sin escobillas, a la salida de este un circuito rectificador para convertir la corriente alterna a corriente directa y un circuito de control para limitar la captación de energía mediante un freno por histéresis, la acción del cual, se puede apreciar en la Fig. 7, al disminuir la potencia drásticamente después de cierta velocidad. Cabe resaltar que la recomendación del fabricante es que la turbina se conecte a una batería junto con la carga para evitar la intermitencia.

El frenado por histéresis bloqueará la turbina cuando las baterías hayan alcanzado los 14.1 V, y reanudará la carga cuando el voltaje esté por debajo de los 12.75 V. Cuando el voltaje de la batería coincide con el punto establecido de regulación, la velocidad disminuirá drásticamente (a casi cero rpm) y la producción se detendrá. La operación de carga normal se reanudará cuando el voltaje de la batería caiga ligeramente por debajo del nivel completamente cargado.

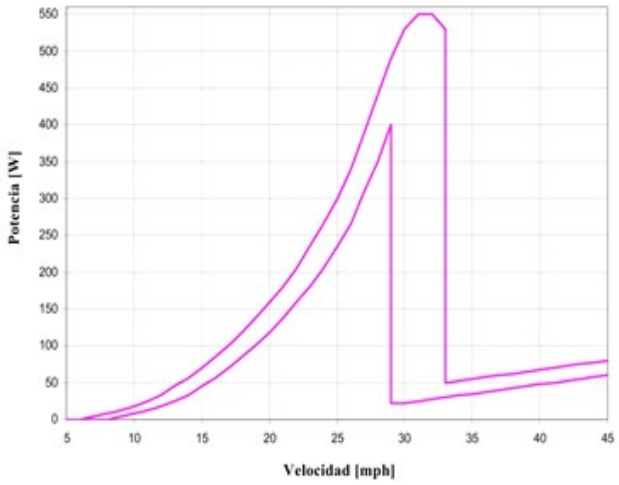


Fig. 7. Potencia de salida del aerogenerador, por la velocidad del viento en los álabes.

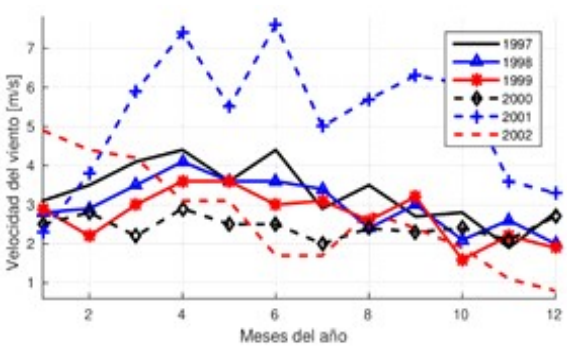


Fig. 8. Medición de velocidad del viento 1997-2002.

3.3. Recurso eólico local

De investigaciones en los medios locales, es interesante destacar que Quintana Roo es mencionado en 2014 por la evaluación de ProMéxico, entre algunos estados con recurso eólico potencial en México tales como Oaxaca, Baja California, Nuevo León, Tamaulipas y Veracruz [22]. Por otro lado, en [23] se menciona que para el funcionamiento de los parques eólicos se necesitan vientos de 7 m/s en promedio y Quintana Roo no los mantiene para la mayor parte del año.

Además, en [9] se describe un estudio del recurso eólico en toda la península de Yucatán (del 2000 al 2007), mediante las estaciones de medición del Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Cabe resaltar, que el promedio de la velocidad del viento en Chetumal no supera los 10 m/s.

En el presente trabajo se tiene registro de la velocidad del viento en la ciudad de Chetumal. En las Figs. 8 y 9 se muestran los perfiles históricos de velocidad del viento promedio para los 12 meses del año, desde 2009 hasta 2017. Los datos

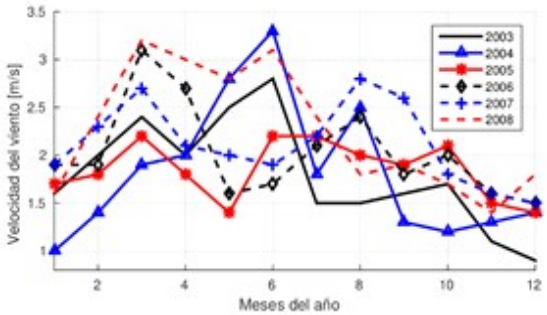


Fig. 9. Medición de velocidad del viento 2003-2008.

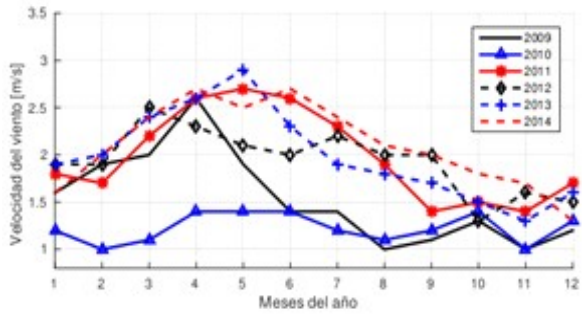


Fig. 10. Medición de velocidad del viento 2009-2014.

fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en el aeropuerto de Chetumal (misma de [9]) coordenadas 18° 30 0 02 00 N 88° 19 0 40 00 W . Se debe aclarar que los números de meses del año pertenecen a la numeración habitual, es decir, a enero le corresponde el número 1, febrero el número 2 y así sucesivamente.

De la Fig. 8 a Fig. 11 se muestran los perfiles históricos de velocidad del viento para los 12 meses del año, desde 1997 hasta 2017. Los datos fueron obtenidos por la estación meteorológica instalada en el aeropuerto de Chetumal.

La Fig. 8 muestra los perfiles de la velocidad del viento para los años 1997 a 2002, donde se puede notar que para el 2001 el perfil de velocidad de viento es mayor que para el resto de los años mostrados.

En la Fig. 9 y la Fig. 10, se observa que la velocidad máxima promedio no sobrepasa los 3.5 m/s, y para todos los años se mantiene alrededor de 2 m/s. En la Fig. 10 se puede apreciar que la forma para los perfiles es muy similar para los años 2011 a 2014 y para el año 2010 un perfil muy bajo que oscila entre 1 y 1.5 m/s.

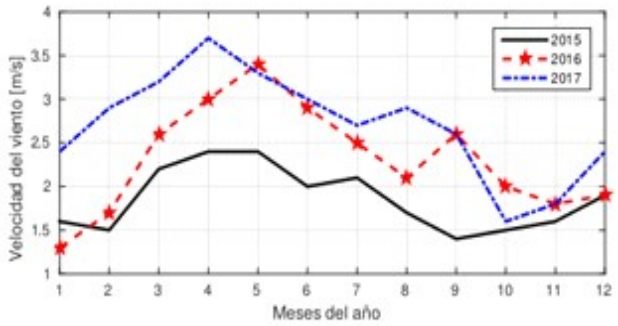


Fig. 11. Medición de velocidad del viento 2015-2017.

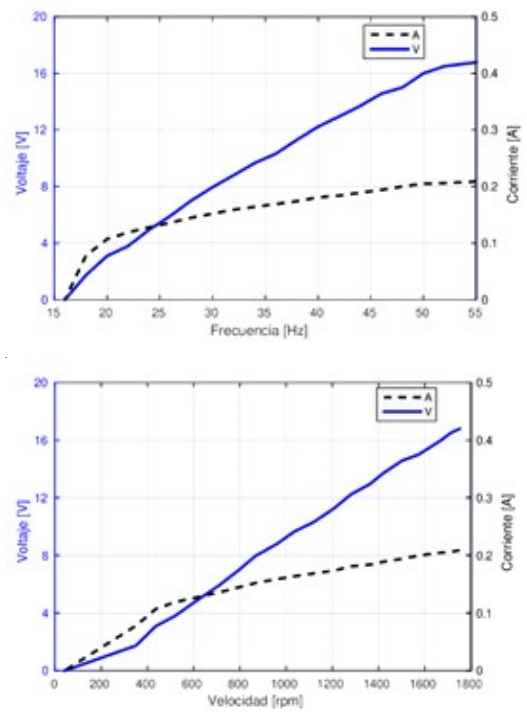


Fig. 12. Voltaje y corriente en la carga de 15.8 Ω, ante la variación de frecuencia en el túnel de viento y velocidad del aerogenerador.

De la Fig. 11 también es importante destacar que para los meses de marzo (3), abril (4) y mayo (5) en los tres años, se tienen velocidades promedio mayores que el resto del año. Por otro lado, de acuerdo con la velocidad promedio, se observa que para el año 2015 no se llega a 2.5 m/s, en 2016, con una tendencia mayor no se alcanzó los 3.5 m/s, mientras que para 2017 apenas rebasa ese valor en el mes 4 (abril), respectivamente.

4. Experimentos

Se realizaron pruebas con la turbina eólica Air X 400 W, colocándola en la azotea del edificio. Sin embargo, por la velocidad del viento que se tiene en la región, las tendencias mostradas en la sección anterior y la capacidad de la misma, el aerogenerador se mueve ligeramente, con dificultad y en muy pocos instantes de tiempo, lo que prácticamente no genera energía eléctrica.

Por lo anterior, se experimentó con el túnel de viento y el aerogenerador, colocando diferentes cargas (resistencias) y modificando las distancias entre el túnel de viento y la turbina de viento. Primero para una carga fija de 15.8 Ω, se modificó la frecuencia de trabajo para el moto-ventilador y con ello variar la velocidad del aerogenerador, la Fig. 12 muestra el

comportamiento del voltaje y corriente en la carga mencionada, ante la variación de frecuencia en el controlador del moto-ventilador y por ende cambios de velocidad en la turbina de viento.

Se midió el viento a la salida del túnel donde se colocó el aerogenerador, mediante un anemómetro para identificar el aire que llega a la turbina. Los mapas de la Fig. 13 se obtuvieron al variar la velocidad del viento en el túnel, mediante la frecuencia del motor, que a su vez varía la velocidad de giro del ventilador que extrae el aire. En esta medición se tomó un radio de 60 cm, para captar toda el área que cubre el aerogenerador. Cabe resaltar que las velocidades del viento a la salida en general son turbulentas, como es lo esperado en estos sistemas no controlados, como se muestra también en [25].

Por último, la Fig. 14 muestra el comportamiento de las variables eléctricas voltaje (V) vs. corriente (I), para diferentes valores de carga (R) y distancia (D), donde se nota que se obtiene más energía de colocar a 70 cm de distancia entre el túnel y el aerogenerador ($D = 70$ cm), con la menor resistencia $R = 2.88\ \Omega$ y conectando una batería de 12 V en paralelo.

5. Conclusiones

Se evaluó un aerogenerador a diferentes velocidades de viento controladas, así como la evaluación del mapa de distribución de viento a la salida del túnel de viento. El aerogenerador se colocó a diferentes distancias del túnel, para lograr la mayor captación de energía eléctrica y se modificó la resistencia de carga para analizar la generación eléctrica.

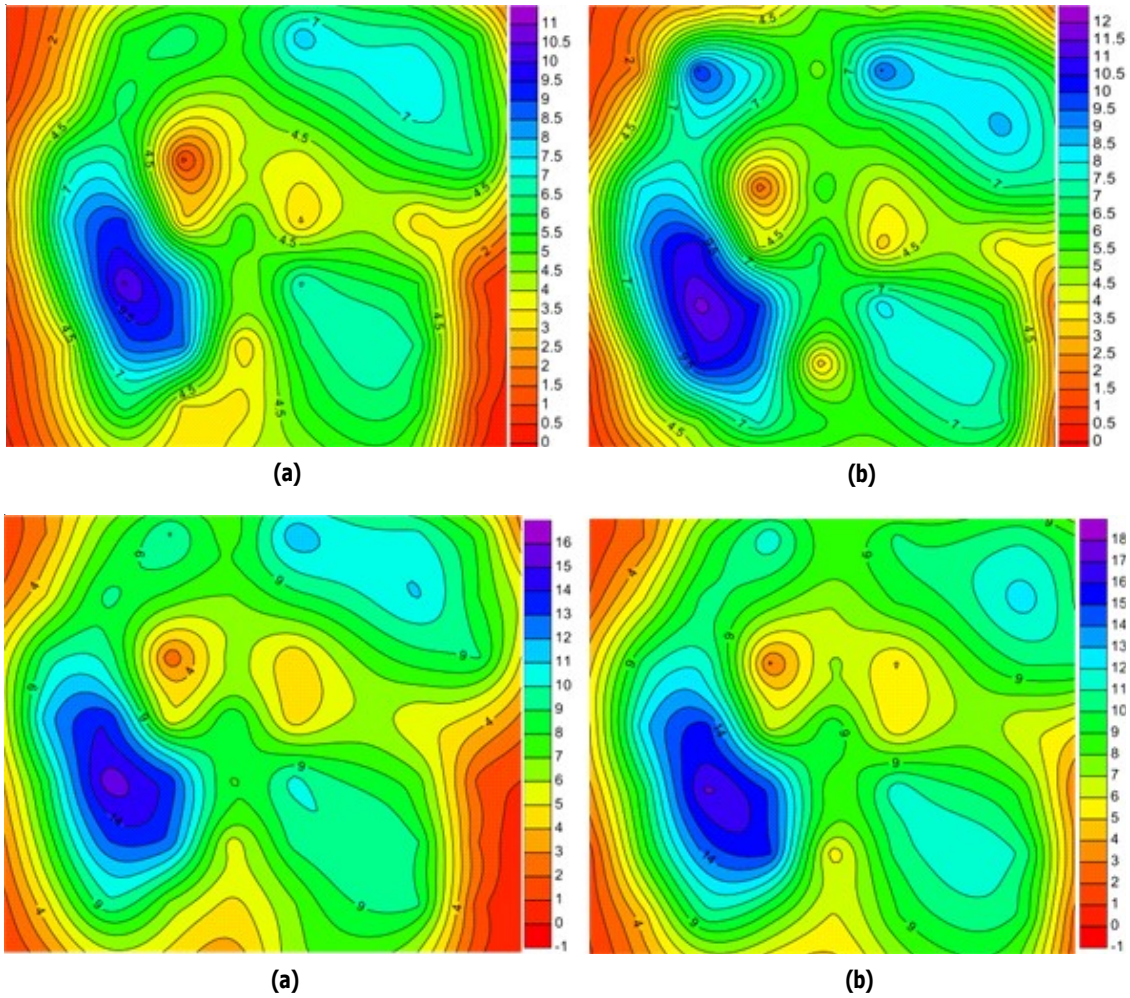


Fig. 13. Distribución de velocidades de viento en la descarga del túnel de viento a 70 cm de distancia. Para (a) 35, (b) 40, (c) 45 y (d) 50 Hz, respectivamente, en el variador de frecuencia del moto-ventilador del túnel.

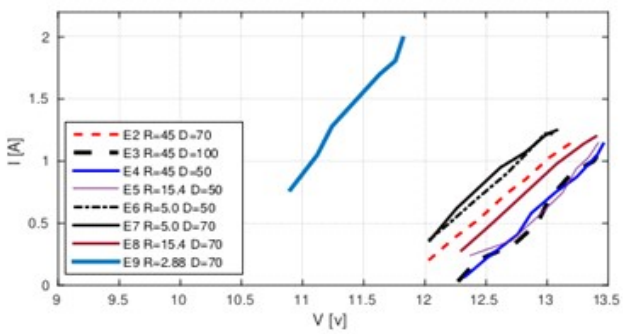


Fig. 14. Salida eléctrica del aerogenerador para diferentes resistencias y distancia del túnel.

Al colocar el aerogenerador fuera del túnel de viento, se logró aproximar a un sistema más real, a pesar de que el experimento se realizó en laboratorio, ya que la velocidad de viento en el ambiente exterior, en general, no se mantiene constante. Sin embargo, la medición del mapa de viento a la salida del túnel proporciona idea de la cantidad de energía eólica que se ingresa a la mencionada turbina de viento.

Mediante los experimentos es posible determinar el C_p de operación de la turbina, con lo que será posible analizar el aerogenerador a escala, con perfiles de viento de la región y con el mismo recurso eólico determinar qué tipo de aerogenerador es más conveniente.

Para el mejor aprovechamiento del recurso eólico local, las recomendaciones principales para producir energía eléctrica son utilizar turbinas eólicas de eje vertical con buen desempeño a baja velocidad.

Nomenclatura

P	Potencia
ρ	Densidad del aire
C_p	Coeficiente de potencia
λ	Relación de velocidad de la punta del álabe
α	Ángulo de inclinación del álabe
A_R	Área cubierta por los álabes durante la rotación
R	Radio del álabe
ω	Velocidad angular del rotor de la turbina
V_v	Velocidad del viento
λ'	Velocidad relativa normalizada
r	Radio equivalente
V_m	Velocidad media del viento
P_v	Potencia extraíble del viento
P_n	Potencia nominal
V_{ci}	Velocidad de arranque
V_n	Velocidad nominal
V_{cf}	Velocidad de paro
A_T	Área de trabajo del túnel
A_A	Área del aerogenerador

Rererencias

[1] J. Chaves Palacio, "Desarrollo tecnológico en la primera revolución industrial," *Revista de Historia*, vol. 17, pp. 1-12, 2004.

[2] M. Best, A. Brown, P. Clark, D. Hollis, D. Middleton, G. Rooney, D. Thomson, C. Wilson, *Small scale wind energy technical report. urban wind energy research project*, Technical report, 2008.

[3] Y. Muñoz-Jadán, M. Espinoza-Bolaños, F. Donoso-Merlet, R. Hidalgo-León, G. Soriano-Idrovo, P. Jácome-Ruiz "Hardware-in-the-Loop for Wind Energy Conversion with Resonant Current Control and Active Damping," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, núm. 7, pp. 1146-1154, julio, 2019

[4] D. Elliott, M. Schwartz, G. Scott, S. Haymes, D. Heimiller, R. George. *Wind energy resource Atlas of Oaxaca*, National Renewable Energy Laboratory, Oak Ridge, 2003. TN 37831 0062.

[5] O. Jaramillo, M. Borja, "Wind speed analysis in la ventosa, mexico: a bimodal probability distribution case," *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1613-1630, 2004.

[6] W.P. COMPLEX, 2018, *Oaxaca ii-iii-iv wind power complex*, disponible en https://www.acciona-energia.com/areas-of-activity/wind-power/major-projects/oaxaca-ii-iii-iv-wind-power-complex/.

[7] L. Fried. *Global wind energy statistics 2017*. TR 1, Global Wind Energy Council, Brussels, Belgium 2018.

[8] C. Trust, *Small scale wind energy*, Technical report, Carbon Trust and Met Office. 2008.

[9] R. Soler-Bientz, S. Watson, D. Infield, "Wind characteristics on the yucatán peninsula based on short term data from meteorological stations," *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 754 - 764, 2010.

[10] Q. Hernández-Escobedo, F. Manzano-Agugliaro, A. Zapata-Sierra, "The wind power of Mexico," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2830-2840, 2010.

[11] J. Mendoza-Vizcaino, A.Sumpera, A. Sudria-Andreu, J.M. Ramirez, "Renewable technologies for generation systems in islands and their application to Cozumel Island, Mexico," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64, pp. 348-361, octubre, 2016.

[12] G. Hernández-Galvez, R. Saldaña, U. Miranda, O. Sarracino, M. Castillo, D. Almenares, A. K. Tapia-Gómez, "Wind resource assessment and sensitivity analysis of the levelised cost of energy. A case study in Tabasco, Mexico," *Renewable Energy Focus*, vol. 29, pp. 94-106, junio, 2019.

[13] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley, 2a ed., 2006.

[14] J. Villanueva, L. Alvarez-Icaza, *Wind turbine modeling by friction effects*, In the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, 2008-2013. Seoul, Korea, 2008.

[15] Z. Lin, G. Qingding, *Adjustable-pitch and variable speed control of wind turbines using non linear algorithm*, In Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, Portland, OR, USA, pp. 270- 273, 2003.

[16] M. Balas, A. Wright, M. Hand, K. Stol, Dynamics and control of horizontal axis wind turbines, In the *39th IEEE Conference on Decision and Control*, USA, pp. 3781-3793, 2003.

[17] A. Dadone, L. Dambrosio, "Estimator based adaptive fuzzy logic control technique for a wind turbine generator system," *Energy Conversion and Management*, vol. 44, núm. 1, pp. 135-153, 2003.

[18] A. Maleki, F. Pourfayaz, "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with lpsp technology by using evolutionary algorithms," *Sol. Energy*, vol. 115, pp. 471-483, 2015.

[19] H. Tazvinga, B. Zhu, X. Xia, "Optimal power flow management for distributed energy resources with batteries," *Sol. Energy*, vol. 102, pp. 104-110, 2015.

[20] M. Amrollahi, S. Bathaee, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response," *Appl. Energy*, vol. 202, pp. 66-77, 2017.

[21] L.Y. Villagrán-Villegas, I.V. Hernández-Rodríguez, J.C. Anzelmetti-Zaragoza, A. Marquina-Chávez, C. M. Calderón-Ramón, "Generalidades de estrategias de control en aerogeneradores de transmisión directa," *Científica*, vol. 21, núm. 1, pp 17-24, enero-junio 2017.

[22] Southwest Wind Power, *Manual AIR-X, Air X The New 400 watt turbine*, Flagstaff, Arizona 86001, octubre, 2002 .

[23] S. Blanco, *Quintana Roo tiene potencial para energía eólica*, disponible en: https://sipse.com/novedades/q-roo-entre-los-cinco-estados-con-fuertes-corrientes-de-viento-90087.html. 2014.

[24] A. Galicia, *Carece Quintana Roo de potencial para parques eólicos*, disponible en https://sipse.com/novedades/carece-q-roo-de-potencial-para-parques-eolicos-energia-renovable-medio-ambiente-efecto-invernadero-cop13-cancun-233450.html. 2016.

[25] T. Fernández-Roque, J. A. Correa-Arredondo, J. F. Vázquez-Flores, J. Sandoval-Lezama, A. Mejía-Carmona, "El chorro en toberllino y los vórtices de punta de ala," *Científica*, vol. 21, núm. 2, pp 99-102, julio-diciembre 2017.

AmeliCA

Ameli, Conocimiento Abierto para América Latina y el Sur Global

http://www.amelica.org

Es una iniciativa puesta en marcha por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), la Universidad de Antioquia (UdeA) y la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Se trata de una nueva configuración de estrategias, en respuesta al contexto internacional, regional, nacional e institucional, que busca una solución de Acceso Abierto colaborativa, sostenible, protegida y no comercial para América Latina y el Sur Global.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a05

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 135-142, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Medición de la eficiencia y temperaturas en un transformador tipo seco que alimenta a un rectificador trifásico no controlado*

José Antonio **Álvarez-Salas**
Juan **Segundo-Ramírez**
Víctor Manuel **Cárdenas-Galindo**
Ricardo **Álvarez-Salas**

Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Av. Dr. Manuel Nava No. 8 Zona Universitaria
San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78290
MÉXICO

correos electrónicos (emails):
jaas@uaslp.mx
juan.segundo@uaslp.mx
vcardena@uaslp.mx
ralvarez@uaslp.mx

Recibido 31-01-2020, aceptado 15-05-2020.

Resumen

En este trabajo se presentan las pruebas que se realizaron en un laboratorio a un transformador tipo seco de capacidad de 5 kVA, el cual alimenta a un rectificador trifásico y una carga resistiva conectada en estrella. El propósito es evaluar el comportamiento de la eficiencia cuando en el transformador circulan corrientes no sinusoidales debido a la presencia del rectificador trifásico. Por medio de las mediciones de potencia se calculó la eficiencia en el transformador, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2014. Se presentan resultados y gráficas del comportamiento de la eficiencia. Con el rectificador trifásico en las terminales del transformador se produce una distorsión armónica de las corrientes en los devanados, lo que permitió analizar la modificación del factor *K* a medida que se incrementó la carga resistiva en el rectificador. Adicionalmente se realizan mediciones de temperatura en el transformador mediante dos termopares que se encuentran incluidos entre los devanados y su núcleo, se presentan gráficas comparativas de las mediciones de temperatura.

Palabras clave: eficiencia, factor *K*, rectificador trifásico, temperatura, transformador tipo seco.

Abstract
(Measurement of efficiency and temperatures in a dry type transformer that feeds a three-phase uncontrolled rectifier)

This paper presents the laboratory tests conducted for a 5 kVA dry-type transformer feeding a wye-connected resistive load and a three-phase uncontrolled rectifier. The primary purpose is to evaluate the transformer efficiency performance against non-sinusoidal load currents. The laboratory tests are based on the standard NOM-002-SEDE/ENER-2014. The extensive conducted test results are reported through efficiency graphs. The variation of the harmonically distorted load current, due to the rectifier operation, allows to evaluate the *K*-factor variation for different load levels. In addition to this, the measured internal temperatures are presented in comparative graphs. The temperatures are obtained through thermocouples located between the core and the windings.

Index terms: efficiency, *K*-factor, three-phase rectifier, temperature, dry-type transformer.

1. Introducción

El amplio uso de dispositivos electrónicos en equipos que procesan la energía eléctrica en forma conmutada, genera una condición no sinusoidal de los voltajes y las corrientes que pudieran ser parte de las cargas en los transformadores de uso industrial. La presencia de voltajes y corrientes no sinusoidales en los conductores, equipos o elementos que conforman los sistemas eléctricos industriales, producen un incremento de sus pérdidas y la modificación del factor de potencia local o globalmente de la red [1].

Si los transformadores son uno de los dispositivos más empleados en los sistemas eléctricos industriales, su apropiado dimensionamiento determina la correcta operación del

*Este artículo es la versión extendida de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

transformador. Típicamente las pérdidas presentes en los transformadores varían en función de su capacidad y tipo de cargas que se conectan a este; sin embargo, cuando se consideran cargas que son no sinusoidales se modifica la cantidad de pérdidas en el transformador [2].

Este artículo es la continuación de los trabajos previamente presentados en [3] y [4]. A diferencia de lo presentado en [3], en este artículo se analizan resultados experimentales de un transformador tipo seco de 5 kVA que alimenta a un rectificador trifásico no controlado con carga resistiva.

Con un voltaje de alimentación sinusoidal en el transformador, la corriente será no sinusoidal cuando se conecta en las terminales una carga no lineal como lo es un rectificador trifásico. Las corrientes que circulan en los devanados son no sinusoidales, por lo que su valor eficaz se expresa por la ecuación [5]:

$$I_{rms} = \sqrt{I_o^2 + I_{rms-1}^2 + I_{rms-2}^2 + + \cdots I_{rms-h}^2} \quad (1)$$

Donde
I_0 es la corriente promedio,
I_{rms-1} es la corriente eficaz de la componente fundamental,
I_{rms-h} es la corriente eficaz del *h*-armónica.

Un transformador en el que la corriente distorsionada excede el 5 % del contenido armónico, puede producir un mayor calentamiento en sus devanados y núcleo [6].

La distorsión armónica total (*DAT*) se emplea para cuantificar la presencia de armónicas en los voltajes y corrientes de los convertidores de potencia que se conectan a los sistemas eléctricos, se define para la corriente de acuerdo con la ecuación [5]:

$$DAT_I = \frac{\sqrt{I_o^2 + I_{rms-2}^2 + I_{rms-3}^2 + I_{rms-4}^2 \cdots I_{rms-h}^2}}{\sqrt{I_{rms-1}^2}} 100 \quad (2)$$

Se realiza una ponderación entre los valores eficaces de los armónicos I_o, I_{rms-2}, I_{rms-3},…, I_{rms-h}, y el valor eficaz de la componente fundamental I_{rms-1}. Entre más distorsionada esté la forma de onda mayor será su DAT de corriente.

La valoración de las pérdidas en el transformador ante condiciones no sinusoidales, puede considerar un ajuste en la capacidad, así como una mejora en su eficiencia [6]. Las pérdidas en los transformadores pueden ser divididas en: pérdidas en vacío P_{SC} y pérdidas con carga P_{PC}, como se indica en la ecuación [7]:

$$P_T = P_{SC} + P_{PC} \quad (3)$$

Las pérdidas con carga, son por calentamiento en los conductores debido al efecto Joule. La resistencia en corriente directa de los conductores y el valor eficaz de la señal no sinusoidal, contribuyen en la elevación de temperatura en las bobinas del transformador. Otra componente con carga son las pérdidas por corrientes circulantes y flujo disperso. Las pérdidas en vacío del transformador, en presencia de armónicos dependen del diseño del núcleo y la señal de voltaje [8].

Las pérdidas con carga en el transformador se calculan como se indica en la ecuación [9], [10]

$$P_{PC} = P_{CU} + P_{CC} + P_D \quad (4)$$

Donde
P_{CU} son las pérdidas en el cobre
P_{CC} son las pérdidas por corrientes circulantes
P_D son las pérdidas por el flujo de dispersión

Las corrientes circulantes son muy pequeñas y son causadas por el flujo magnético, fluyen en el devanado, en el núcleo y en otras partes conductoras sujetas al campo magnético. Se incrementan con el cuadrado de la frecuencia de la corriente, por lo que es una componente significativa de las pérdidas en el transformador.

Las pérdidas en el cobre dependen del valor eficaz de la corriente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_{CU} = I^2_{rms} R_{cd} \quad (5)$$

Donde
I_{rms} es el valor eficaz de la corriente no sinusoidal,
R_{cd} es la resistencia en corriente directa de los devanados del transformador.

Las pérdidas por corrientes circulantes dependen principalmente del cuadrado del orden de armónico presente en las señales distorsionadas como se indica en la siguiente ecuación [6]:

$$P_{CC} = N_{CC} \sum_{h=1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_{rms\,h}}{I_{rms\,1}}\right)^2 \quad (6)$$

Donde
N_{cc} es una constante de proporcionalidad,
I_{rms1} es el valor eficaz de la corriente fundamental,
I_{rmsh} es el valor eficaz de las corrientes armónicas en por unidad referidas a la componente fundamental y *h* es el orden del armónico.

Las pérdidas por el flujo de dispersión son función de la geometría del núcleo y las bobinas, el nivel del voltaje del transformador, así como los materiales usados en la construcción del tanque. Este tipo de pérdidas se incrementan con la capacidad del transformador, en [9] se presenta un análisis detallado de este tipo de pérdidas para transformadores de distribución. En este trabajo se consideran despreciables.

Acorde a las normas asociadas con pruebas en los transformadores se tiene la NOM-002-SEDE/ENER-2014 [11], esta norma determina la eficiencia en los transformadores de distribución. La norma considera las pérdidas en vacío y debidas a la carga, referidas a un factor de carga del 80%, derivadas de la medición de las pérdidas al 100% de la carga y corregidas a 85ºC y un factor de potencia unitario de acuerdo con la ecuación:

$$\%E = \frac{100 * (P * S_{nom} * 1000)}{(P * S_{nom} * 1000) + P_{vacío} + (P_{carga} * P^2 * T)} \quad (7)$$

Donde
P es la carga en por unidad (0.8),
S_{nom} son los kVA nominales del transformador,
$P_{vacío}$ son las pérdidas de vacío a temperatura ambiente (W),
P_{carga} son las pérdidas debidas a la carga a temperatura de referencia a 85ºC (W),
T es un factor de corrección para las pérdidas a 70ºC (0.952332).

El factor K mide los efectos del calentamiento provocado por las corrientes armónicas, en relación con la capacidad de la carga y las pérdidas del transformador [6], [12]:

$$K = \sum_{1}^{\infty} h^2 \left(\frac{I_h}{I_{rms}}\right)^2 \quad (8)$$

Donde
I_h es la corriente armónica,
I_{rms} es la corriente eficaz total,
h es el orden del armónico.

El factor K de un transformador es un indicador de la capacidad que tiene el transformador para entregar potencia a una carga no lineal, sin exceder el límite de temperatura para la cual fue diseñado. El factor $K = 1$ indica que no existen armónicas y se asocia a las cargas lineales. Cuanto mayor sea el factor K mayor será el efecto de calentamiento en el transformador por la presencia de armónicas en sus señales de voltaje y corriente. El factor K es utilizado por los fabricantes y usuarios, para ajustar el nivel de carga en el transformador como función de las corrientes armónicas distorsionadas debidas al uso de convertidores de potencia [12], [13].

2. Desarrollo

El propósito del proyecto es analizar el comportamiento de la eficiencia, cambio del factor K y la elevación de temperaturas, en un transformador tipo seco, el cual se utiliza típicamente para procesos de rectificación industrial. El prototipo se encuentra en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas del Área Mecánica y Eléctrica de la Facultad de Ingeniería. Conforma parte de la infraestructura que se tiene disponible para el estudio de transformadores.

En la figura 1 se muestra el transformador en su gabinete y la distribución de las bobinas del transformador. El transformador tiene un arreglo en delta en el primario de 220V/13.2 A y un arreglo en estrella en el secundario de 440 V/6.56 A. Cuenta con derivaciones para realizar ajustes al nivel de voltaje del secundario desde 440 V a 460 V, para las pruebas de eficiencia se conectaron estas derivaciones para un voltaje de 440V. En la tabla 1 se muestran los valores nominales del transformador.

El fabricante incluyó en las bobinas y núcleo del transformador termopares del tipo J, el propósito fue tener un registro de la

Fig. 1. Gabinete y bobinas del transformador de 5 kVA.

Tabla 1. Valores nominales del transformador de 5 kVA.

Fases	Capacidad	Tipo	Frecuencia	% Eficiencia
3	5 kVA	Seco	60 Hz	96
Voltaje	**Corriente**	**Conexión**	**% Impedancia**	**Elev.-Temp.**
220V/440V	13.2 A/6.56 A	Delta-Estrella	3.75	65º C

temperatura interna del transformador. En la figura 2 aparecen las imágenes de las conexiones de termopares y del indicador para el registro de las temperaturas en el transformador. El registro se llevó a cabo en intervalos de 10 minutos hasta los 60 minutos de operación. Las pruebas del transformador se realizaron con porcentajes de carga, en cada etapa de prueba se requirió de 120 a 160 minutos para un proceso de enfriamiento.

Se utilizó un analizador de calidad de la energía trifásico [12], considerando que se debe registrar señales no sinusoidales de voltaje y corriente en el transformador cuando se utiliza el rectificador. Con los sensores de voltaje y corriente del analizador en las terminales del primario y secundario, se procesan las mediciones de potencia que requiere la ecuación (7) para el cálculo de la eficiencia. En la figura 3 se indican los diagramas de conexión en el transformador con la carga resistiva y el rectificador trifásico.

Fig. 2. Termopares en las bobinas y núcleo del transformador.

En la figura 4, se muestra la estructura interna del transformador con el arreglo de las resistencias de potencia como carga. La carga resistiva se conectó en estrella, con porcentajes de: 80%, 100% y 120%. El valor nominal del banco de resistencias de potencia es de: 16 Ω @ 1000 W/127 V.

En la figura 5 se muestra el transformador con el rectificador y el arreglo de resistencias de potencia. El rectificador trifásico no controlado se construyó con diodos de potencia de: 400-1000 V @ 15 A en un arreglo de dos diodos y sus disipadores por cada rama del convertidor. A la salida del rectificador se produce una corriente directa con una salida de 570 V y 8.5 A que alimenta a una carga resistiva.

3. Resultados

Los resultados para el cálculo de la eficiencia y el factor *K* se realizaron con la carga resistiva y el rectificador trifásico. Las mediciones con los circuitos de prueba y cambios en los porcentajes de carga se indican en las tablas 2 y 3. El nivel de la distorsión armónica total de las corrientes del transformador, fue el indicador de la presencia de armónicas por la conexión del rectificador al transformador. En una señal de corriente sin contenido armónico la distorsión armónica tiene un valor nulo, de acuerdo a la ecuación 2. Sin embargo, en las mediciones con carga resistiva el voltaje de la fuente trifásica presenta

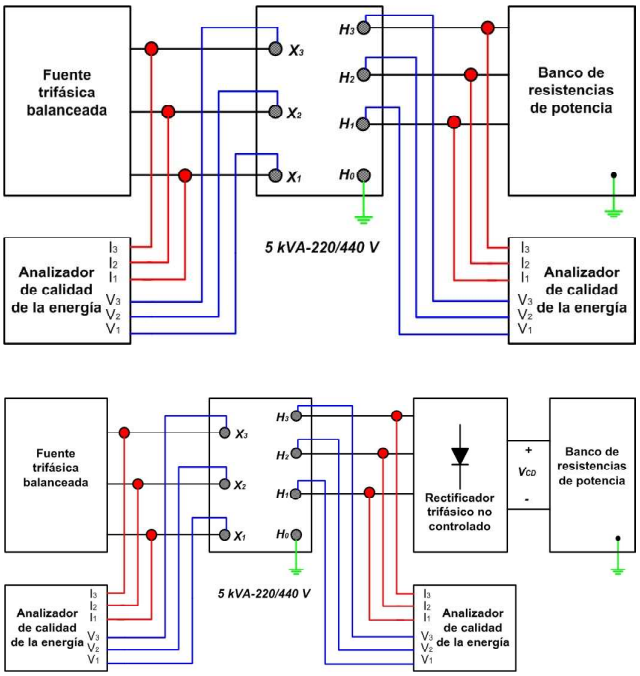


Fig. 3. Diagrama de conexiones en el transformador para las mediciones de potencia.

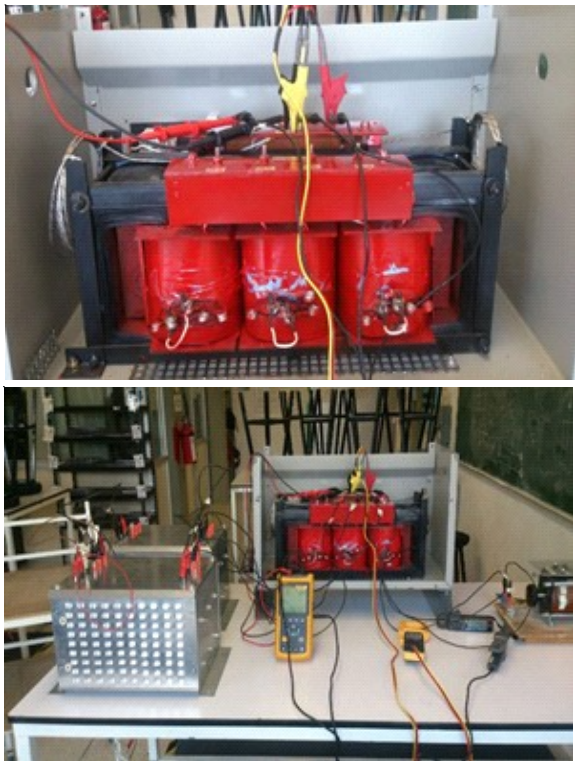


Fig. 4. Mediciones en el transformador con carga resistiva.

Tabla 2. Distorsión armónica y potencias del transformador con el circuito resistivo.

Carga (%)	DAT-Ip (%)	DAT-Is (%)	P_{ent} (kW)	P_{sal} (kW)
80	0.8	0.8	4.03	3.89
100	0.9	0.8	5.05	4.84
120	0.9	0.8	6.05	5.75

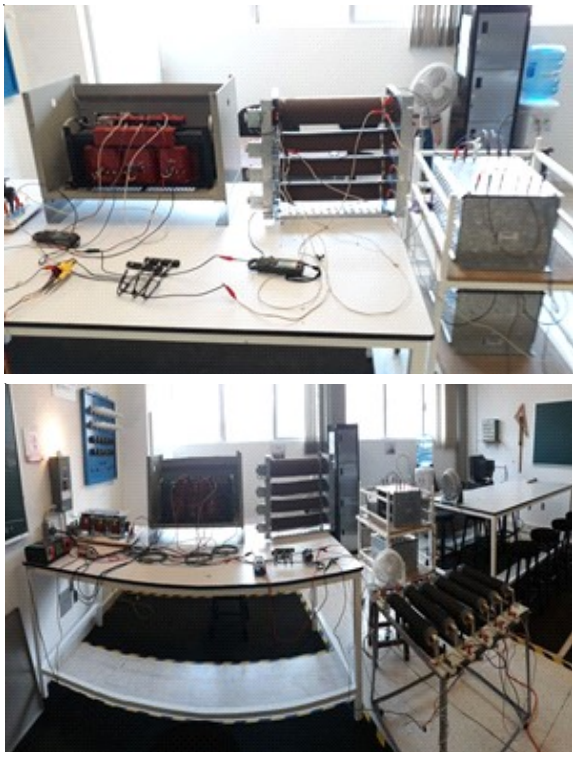


Fig. 5. Mediciones en el transformador con el rectificador trifásico y carga resistiva.

Tabla 3. Distorsión armónica y potencias del transformador con el rectificador trifásico.

Carga (%)	DAT-Ip (%)	DAT-Is (%)	P_{ent} (kW)	P_{sal} (kW)
80	24.80	27.50	4.38	4.12
100	25.00	27.20	5.09	4.65
120	25.50	27.56	6.06	5.41

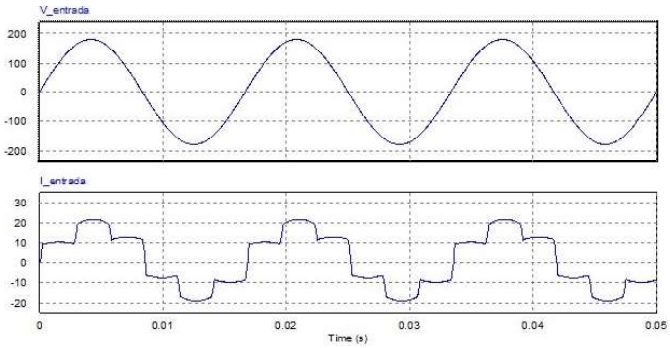


Fig. 6. Formas de onda de voltaje y corriente a la entrada en el transformador con el rectificador trifásico.

una pequeña distorsión, por lo que en la tabla 2 la distorsión armónica de la corriente presenta valores diferentes de cero.

En las figuras 6 y 7, se muestran las señales de simulación digital del voltaje y la corriente en la entrada y salida del transformador con el rectificador trifásico. Las formas de onda de corriente tienen una distorsión armónica del 25 al 27%, un valor típico que se asocia con las corrientes armónicas de un sistema de rectificación trifásico. Para la simulación digital de los voltajes y las corrientes, en el modelo del transformador se utilizaron

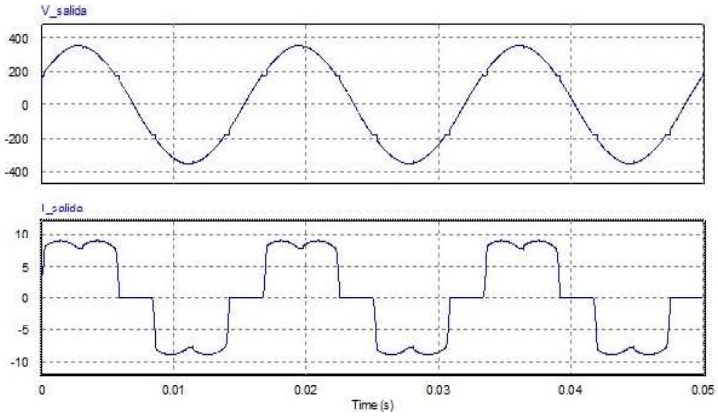


Fig. 7. Formas de onda de voltaje y corriente a la salida del transformador con el rectificador trifásico.

los parámetros de resistencias y reactancias que se obtuvieron de las pruebas indicadas en el anexo.

La eficiencia del transformador se calculó con la ecuación (7) empleando las mediciones de las tablas 2 y 3 así como la medición de la potencia en vacío de aproximadamente de 50 W. Con la información anterior se construyeron las gráficas de la figura 8 en donde se muestra la modificación de la eficiencia del transformador con la carga resistiva y el rectificador trifásico.

El decremento en la eficiencia del transformador, representa principalmente un incremento de las pérdidas en el cobre y por corrientes circulantes, las cuales se indican en las ecuaciones (5) y (6). A valor nominal y carga resistiva el transformador presenta una efi-

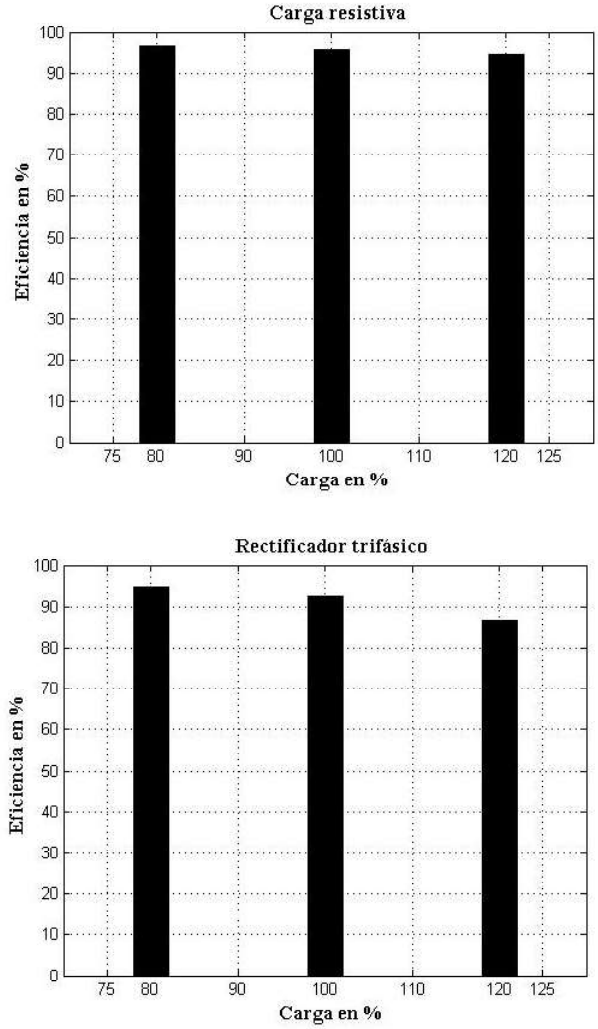


Fig. 8. Comportamiento de la eficiencia del transformador.

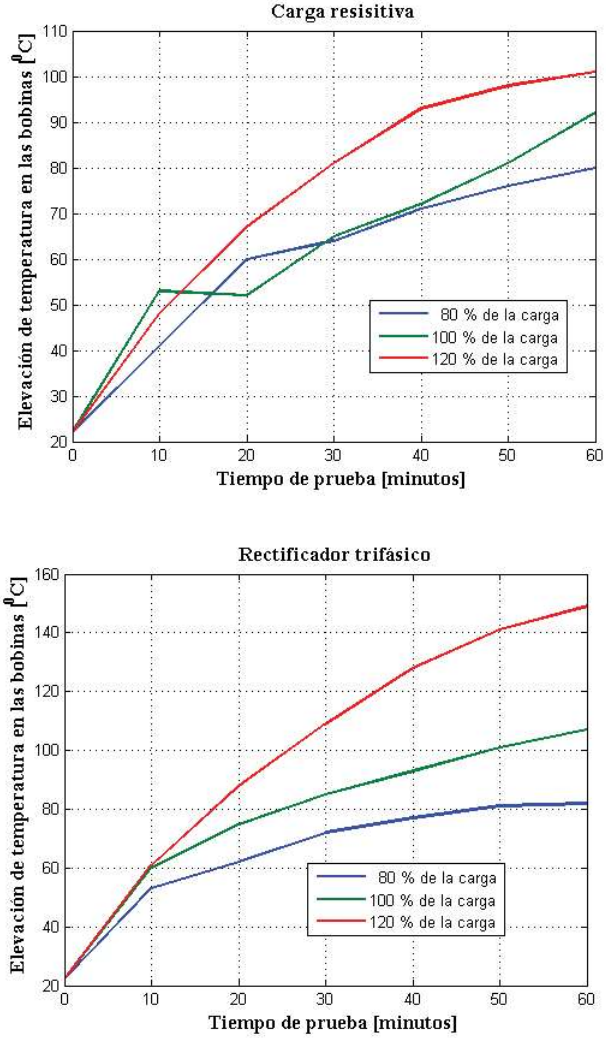


Fig. 9. Elevación de temperatura en las bobinas del transformador.

ciencia del 95.6%, mientras que con el rectificador dismunyó a 92.5%. Con un incremento del 20 % en la carga resistiva del transformador su eficiencia disminuyó a 94.5%, y con el rectificador disminuyó al 88.8%. La sobrecarga y la no linealidad de la corriente afectan la eficiencia del transformador de forma significativa, por lo que el transformador limita la capacidad de entregar los 5 kVA que se especifican en su placa.

En el proceso de medición de las temperaturas en las bobinas y núcleo, se realizó un registro de lecturas a través del indicador conectado a los termopares y colocado en la parte frontal del gabinete del transformador. Con estos registros, se construyeron las gráficas de incremento de temperaturas en las bobinas como se indica en la figura 9. De acuerdo con sus datos nominales, el transformador tiene la posibilidad de permitir una elevación de temperatura de 65ºC sobre el medio ambiente en el que se encuentre.

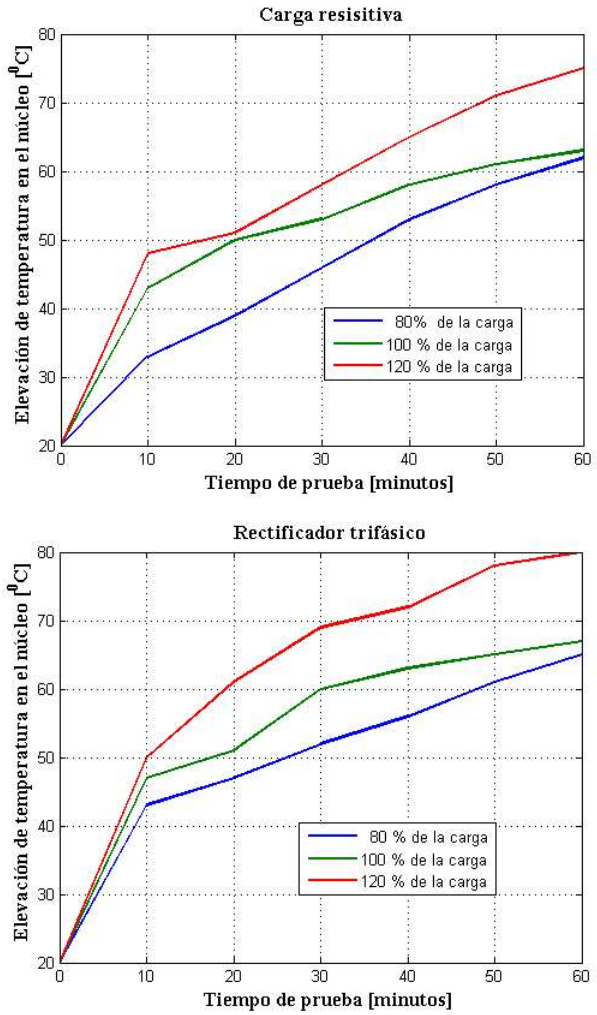


Fig. 10. Elevación de temperatura en el núcleo del transformador.

En la figura 9 donde aparece la gráfica del rectificador trifásico con sobrecarga, se muestra un incremento mayor a los 40ºC en las bobinas, respecto a las pruebas con carga resistiva. El transformador no cuenta con ventilación externa, por lo que existe una concentración de calor dentro del gabinete, cada prueba fue realizada con intervalos de enfriamiento para tener una misma temperatura de referencia ante los cambios de carga.

En la figura 10, se indica el incremento de temperatura en el núcleo con la carga resistiva y el rectificador. En estas dos gráficas de puede observar que existe proximidad en las curvas, lo anterior debido a que las pérdidas en el núcleo son función principalmente de la señal de voltaje. Para el caso de los voltajes en los devanados del transformador con carga resistiva y con el rectificador son prácticamente sinusoidales.

Con las mediciones de las corrientes en el analizador de calidad de la energía, se obtuvieron las magnitudes y frecuencias de las corrientes armónicas debidas al rectificador. Empleando la ecuación (8) y las mediciones de las corrientes se calcularon los diferentes valores del factor K que aparecen en la tabla 4. En un transformador con alimentación sinusoidal y carga lineal su factor es $K = 1$.

Debido a una pequeña distorsión en la señal de voltaje que alimenta al transformador con carga resistiva, el factor K de la tabla 4 no tiene un valor exacto de la unidad. Para el caso del rectificador trifásico con la DAT = 27% en la corriente, el factor K se incrementó cuatro veces independientemente del porcentaje de carga. De acuerdo con la ecuación (6), el cuadrado del orden de las armónicas de corriente de frecuencias superiores, contribuyen al incremento del factor. Por lo anterior se valida que el factor K es dependiente de la distorsión armónica de sus variables eléctricas como se indica en [6] y [15].

El incremento de las pérdidas en los transformadores, requiere de un sistema de monitoreo y diagnóstico que permita identificar las posibles fallas por las sobrecargas o efecto de las armónicas que circulan en sus devanados. En los trabajos que se presentan en [16] y [17], se hace referencia a técnicas o sistemas de diagnóstico y monitoreo aplicado a transformadores industriales y de potencia.

Tabla 4. Factor *K*.

Carga resistiva	Factor *K*	Rectificador trifásico	Factor *K*
Prueba @ 80%	1.004	Prueba @ 80%	4.281
Prueba @ 100%	1.005	Prueba @ 100%	4.150
Prueba @ 100%	1.006	Prueba @ 120%	4.540

4. Conclusiones

En este trabajo se probó experimentalmente la reducción de la eficiencia e incremento del factor *K* para un transformador trifásico del tipo seco, que alimenta a un rectificador trifásico no controlado. El cálculo de la eficiencia se realizó a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2014. El cálculo del factor *K* se realizó a través del estándar IEEE-C57.110-1988. La circulación de las corrientes armónicas en los devanados del transformador, tuvieron implicación en la elevación de temperatura dentro del transformador. Lo anterior se verificó con las mediciones que se realizaron a través de los termopares incluidos en las bobinas y en el núcleo, así como con los cambios de carga en las terminales del transformador. Las normas vigentes son claras al respecto de la conexión de convertidores electrónicos de potencia con los transformadores de uso industrial. Analizar el comportamiento de la eficiencia y factor *K* en los transformadores permite a estudiantes e ingenieros la especificación correcta de estos equipos. Este trabajo es una contribución a la infraestructura que fortalece el desarrollo de prácticas en transformadores, tanto para los programas de licenciatura como de posgrado en Ingeniería Eléctrica dentro de la Facultad de Ingeniería.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido de los laboratorios involucrados de la Facultad de Ingeniería a través de su personal, alumnos e infraestructura en las pruebas realizadas al transformador de 5 kVA.

Anexo

En la tabla 5 aparecen los parámetros del circuito equivalente del transformador. Cuando se recibió el transformador, se realizaron las pruebas de circuito abierto y circuito corto de acuerdo a lo que se especifica en [18], [19]. En estas pruebas se verificó la condición del transformador. Con las mediciones se procedió a obtener los valores de las resistencias y reactancias que aparecen en la tabla, los cuales se encontraron acorde a su capacidad.

Tabla 5. Parámetros del transformador de 5 kVA.

Impedancia del primario	Impedancia del secundario	Rama de magnetización
R_1=0.13 Ω	R_2=0.515 Ω	X_M= 266.310 Ω
X_1=0.04 Ω	X_2=0.160 Ω	R_C= 565.102 Ω

Referencias

[1] L. Astudillo, A. Vásquez, J. Rojas, "Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia," *Científica*, vol 20, núm. 1, pp 3-11, enero-junio 2016.

[2] IEEE Std. C57.120-2017, *Guide for Loss Evaluation of Distribution and Power Transformers and Reactors*, 2017.

[3] I. G. Perez, J. A. Alvarez, J. Segundo, "Comparación de las pérdidas en un transformador tipo seco de 5 kVA ante carga lineal y no lineal," *Revista Pistas Educativas*, vol. 40, núm. 130, 2018.

[4] J. A. Alvarez, J. Segundo, V. M. Cardenas, R. Alvarez, "Medición de la eficiencia y temperaturas en un transformador seco que alimenta un rectificador 3φ", XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2019), Ciudad de México, Nov 2019.

[5] IEEE Std. 1459-2010, *Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced, Unbalanced Conditions*, 2010.

[6] IEEE Std. C57.110-1988, *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-Sinusoidal Load Currents*, 1988.

[7] A. Elmoudi, M. Lethonen, "Effect of harmonics on transformers loss of life," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 408-411, 2006.

[8] R. Arseneau, E. So, E. Hanique, "Measurments and Correction of No-Load Losses of Power Transformers," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, núm. 2, pp 503-506, 2005.

[9] J. C. Olivares, J. Cañedo, P. Moreno, J. Driesen, R. Escarela S. Palanivasagam, "Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electrto-magnetic shields," *Electric Power Systems Research*, vol. 63, 2002, pp. 1-7.

[10] E. Cazacu, L. Petrescu, V. Lonita, "Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents," *15th International Conference on Electrical Machines Drives and Power Systems*, 2017.

[11] Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2014, *Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución*, 2014.

[12] S. Hasan, I. Daut, S. Taib, "K-Factor due to Implementing of DC Unbalanced/Balanced of a Transformer", *2007 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics Procedings*, Decembre 4-6, 2007, Melaka, Malaysia.

[13] T. Shun, X. Xiangning "Comparing transformer de-rating computed using the harmonic loss factor FHL and K-Factor", *3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Thechnologies*, 2008, pp. 1631-1634.

[14] Metrel Power Quality Analyzer MI2192, *Instruction Manual Version 3*, Code No. 20750701.

[15] M. Salih Taci, A. Domijan Jr. "The Effects of Linear and Nonlinear Operation Modes in Transformers", *2004 11th Int. Confernce on Harmonics and Quality of Power*, 2004, pp. 244-249.

[16] M.C. Hernandez, J. Hernandez, F.E. Hernandez, "Sistemas para la gestión de la condición de los transformadores de potencia," *Científica*, vol 17, núm. 2, pp. 83-88, abril-junio 2013.

[17] R.S. Bhide, M.S. Srinivas, I. Voloh, " Detection of inter-turn fault in transformers at incipient level," *XXI Int. Conference on Electrical Machines (ICEM)*, septiembre 2014, pp, 1542-1548

[18] V. Perez-Amador, *Pruebas de equipo eléctrico, transformadores de distribución y potencia*, Limusa, 1985.

[19] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, *Máquinas eléctricas y transformadores*, Alfaomega, 3ª ed., 2002.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a07

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 143-152, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Modelado de orden fraccional de la dinámica de robots manipuladores de 1, 2 y 3 GDL*

Israel **Cerón-Morales**

Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica
Ingeniería Electrónica
Calle Luis Donaldo Colosio S/N, Col. Arroyo del Maíz,
CP 93230, Poza Rica, Veracruz.
MÉXICO

correos electrónicos (emails):
israel.ceron@itspozarica.edu.mx

Recibido 31-01-2020, aceptado 29-05-2020.

Resumen

Este documento presenta el modelado de orden fraccional de la dinámica de robots manipuladores de 1, 2 y 3 grados de libertad (GDL). Se presenta la demostración de estabilidad del modelo de orden fraccional mediante el segundo método de Lyapunov. Se considera un parámetro físico básico, la inercia de masa de los eslabones empleados. Se utiliza el software Freecad para el diseño mecánico. Se simula el modelo dinámico y en el caso de los manipuladores de 2 y 3 GDL se presentan trayectorias en el plano (x, y) y en el espacio (x, y, z) respectivamente. Los modelos se programan en una tarjeta de desarrollo basada en un microcontrolador, la ventaja de la tarjeta de desarrollo se encuentra en sus periféricos de salida debido a que cuenta con dos canales analógicos de salida, y estos se envían a un osciloscopio, los resultados obtenidos están de acuerdo con los modelos presentados.

Palabras clave: modelo-dinámico, orden-fraccional, programación, robots-manipuladores, 1, 2, 3 GDL.

Abstract
(Fractional Order Model of the dynamic of manipulate-robots of 1,2 & 3 DOF)

This document presents the fractional-order modeling of the dynamic of robots manipulators of 1, 2 and 3 degrees of freedom (DOF). It is considered a basic physical parameter, the mass inertia of the links used. Freecad software is used for mechanical design. The demonstration of the stability of the fractional-order model is shown using Lyapunov's second method for stability. The dynamic model is simulated and. In the case of the manipulators of 2 and 3 DOF trajectories are shown in a plane (x, y) and a space (x, y, z) respectively. The models are programmed in a microcontroller based development board, the advantage of this board are its output peripherals since it has two analog output channels sent to an oscilloscope, the results obtained are in line with the models shown.

Index terms: dynamic-model, fractional-order, manipulators-robots, programming, 1, 2 and 3 DOF.

1. Introducción

Los modelos matemáticos son aproximaciones al comportamiento de los sistemas físicos, dentro de las herramientas matemáticas disponibles el Cálculo de Orden Fraccional (COF) presenta características interesantes comparado con el cálculo de orden entero, comparando en el tema del modelado dinámico de sistema el COF presenta una mejor aproximación que el cálculo de orden entero, el COF se aplica al modelado de diversos sistemas, por ejemplo, el modelo dinámico de circuitos eléctricos basado en ecuaciones diferenciales de orden entero, muestra diferencias entre los datos experimentales y los datos generados por los modelos, un circuito eléctrico ampliamente estudiado es el formado por un resistor y un capacitor conectados en serie, el modelo de dicho circuito fue cuestionado debido a la diferencia entre los datos del modelo de orden entero y los datos experimentales, Gómez-Aguilar [1] presenta un modelo de orden fraccional del circuito RC, y los datos del modelo de orden fraccional presentar un error notoriamente más pequeño que el modelo de orden entero, en el trabajo de Goodwine [2] se presenta la aplicación del COF en el estudio de la dinámica del proceso de soldadura, Tejado [3] aplica el COF al estudio del brazo humano, y Rosario [4] utiliza COF en los ejes de un brazo robótico; por su parte, Shalaby [5] mediante el COF modela un péndulo invertido, Zhang [6] presenta el COF en la estimación del estado de carca de un ultracapacitor, Shi *et al*. [7] demuestran que un control basado en COF permite rechazar perturbaciones, Cerón-Morales [8] mediante el COF aplica un control de un concentrador solar.

Los robots manipuladores cuales pueden modelarse con diferentes técnicas [9], una de las ecuaciones de modelado de

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

robots ampliamente aplicada es la de Euler-Lagrange, el resultado es un sistema de ecuaciones diferenciales de orden entero. La propuesta de un modelo de orden fraccional debe en primer lugar cumplir condiciones de estabilidad, si el modelo de orden fraccional cumple requisitos de estabilidad entonces se puede simular y aplicar con un propósito práctico, por lo que se presenta la demostración de estabilidad aplicando el segundo criterio de Lyapunov.

Aplicar el modelado de orden fraccional a situaciones de la vida real [10] es difícil, por lo que en este trabajo se utiliza una tarjeta de desarrollo para implementar el modelo de orden fraccional de robots manipuladores de uno, dos y tres grados de libertad (GDL), se han reportado implementaciones utilizando microcontroladores como en el trabajo de Flores-Ordeñana *et al*. [11], donde se utiliza una tarjeta STM32 debido a sus ventajas incorporadas [12], [13].

Este trabajo está limitado a mostrar resultados de simulación implementados en una tarjeta de desarrollo STM32L476, debido a que la construcción física de un robot con los parámetros de diseño más austeros posibles requiere de una inversión financiera que por el momento no es posible realizar.

2. Desarrollo

Un eslabón robótico es una pieza mecánica, este elemento cuenta con propiedades mecánicas que deben ser conocidas numéricamente, en la Fig. 1 se observa un eslabón diseñado en un software libre llamado FreeCAD.

Los parámetros mecánicos requeridos para realizar una simulación dinámica son el momento de inercia de masa, también llamada inercia rotacional, y la posición del centroide, la pieza debe de ser de un material solido cuya densidad volumétrica de masa debe ser un dato conocido (ρ), en la Tabla 1 se divide el eslabón en cuatro figuras geométricas básicas y sus ecuaciones para el cálculo de momentos de inercia de masa y centroide de especifican.

Se aplica el teorema de los ejes paralelos al calcular el momento de inercia de masa de la figura compuesta, la inercia rotacional de los huecos de la figura es de signo negativo en el cálculo de la inercia de masa de la figura completa. Se diseñan los parámetros del eslabón mediante las ecuaciones de la Tabla 1, considerando un material con densidad volumétrica de masa conocida, entonces se calcula la masa del elemento mecánico, y con estos valores numéricos conocidos se diseña un mecanismo robótico, el más simple es un solo eslabón [14] acoplado mecánicamente a un motor, con este mecanismo como punto de partida se realiza el modelo dinámico de este mecanismo.

Considerando el diagrama de un manipulador de un grado de libertad (1GDL) mostrado en la Figura 2, en el cual se observan parámetros como la masa, longitud, inercia rotacional, dichos parámetros mecánicos y los valores de simulación son descritos en la Tabla 2.

El modelo matemático de orden entero se obtiene mediante la ecuación de Euler-Lagrange, el modelo dinámico resultante es (1):

$$\tau = (ml^2 + I)\ddot{q} + b\dot{q} + mgl_c sen(q) \tag{1}$$

El objetivo es posicionar el eslabón en una posición angular deseada (q_d). De manera que (1) se escribe en términos de las variables de estado (2) y (3):

$$\tilde{q} = q_d - q \tag{2}$$

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} \tag{3}$$

En términos de las variables de estado el sistema dinámico se presenta en (4):

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\tilde{q}\\ \dot{q}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}-\dot{q}\\ (ml^2 + I)^{-1}(\tau - bq - mgl_c sen(q))\end{bmatrix} \tag{4}$$

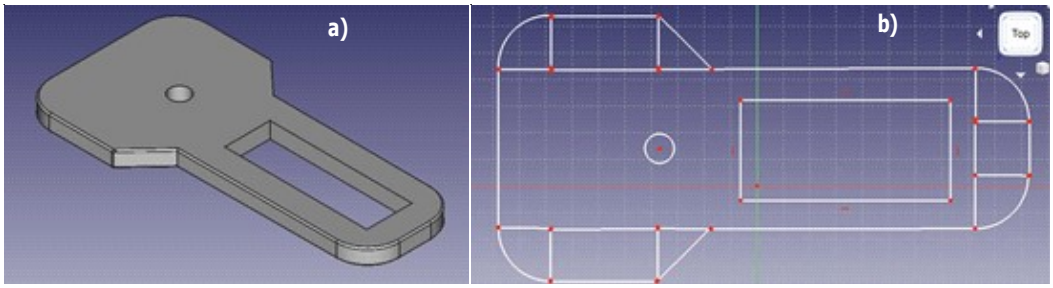
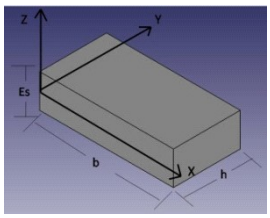
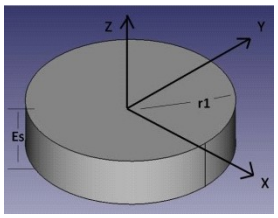
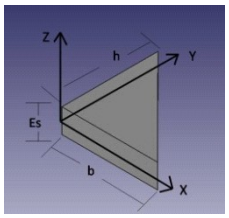
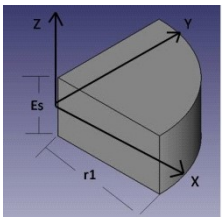


Fig. 1. a) Diseño de un eslabón realizado en Freecad, b) plano del eslabón dividido en figuras geométricas básicas.

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 143-152, julio-diciembre 2020, ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional, México.
DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a07

Tabla 1. Ecuaciones mediante las cuales se calculan los parámetros básicos de las figuras geométricas simples que forman al eslabón robótico.

Rectangular	Circular	Triangular	Córner
			
Momento de Inercia de Masa			
$(\rho \cdot Es) \cdot \left[\frac{bh^3}{12} + \frac{b^3h}{12}\right]$	$\frac{r_1^2}{2} \cdot (\rho Es \pi r_1^2)$	$\left(\frac{4\rho Es}{3}\right)\left(\frac{bh}{2}\right)[h^2 + b^2]$	$\frac{r_1^2}{8} \cdot (\rho Es \pi r_1^2)$
Centroide			
$\left(\frac{b}{2}, \frac{h}{2}, \frac{Es}{2}\right)$	$\left(0,0, \frac{Es}{2}\right)$	$\left(\frac{b}{3}, \frac{h}{3}, \frac{Es}{2}\right)$	$\left(\frac{4r_1}{3\pi}, \frac{4r_1}{3\pi}, \frac{Es}{2}\right)$

Si se expresa en términos de la transformada de Laplace se obtiene (5).

$$\begin{bmatrix} s\tilde{q} \\ s\dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q}(s) \\ (ml^2 + I)^{-1}(\tau - b\dot{q}(s) - mgl_c sen(q(s))) \end{bmatrix} \tag{5}$$

La derivada de orden entero de la función de la posición angular se expresa por (6), y de acuerdo con Krishna [2] la derivada orden fracciona es (7).

$$\mathcal{L}\left\{\frac{dq(t)}{dt}\right\} = sq(s) \tag{6}$$

$$\mathcal{L}\left\{\frac{d^{\mu}q(t)}{dt^{\alpha}}\right\} = s^{\mu}q(s) \tag{7}$$

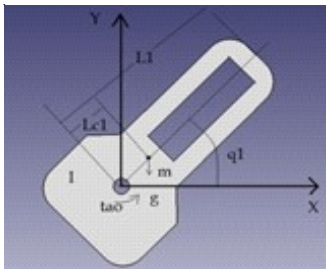


Fig. 2. Diagrama del eslabón robótico de 1 grado de libertad.

La ecuación (7) tiene una aproximación en términos de un cociente, es una aproximación en fracciones continuas indicada en (8).

$$s^{\mu}q(s) \approx \frac{\mathrm{As} + 1}{\mathrm{s} + \mathrm{A}} \tag{8}$$

Tabla 1. Parámetros físicos del manipulador de 1 grado de libertad.

Parámetro	Eslabón 1	Valor	Unidades
Masa	m	1	kg
Longitud	L	1	m
Longitud de centro de masa	lc	0.5	m
Inercia Rotacional	I	0.1	kg·m^2
Coeficiente de Fricción Viscosa	b	0	N·m·s^{-1}
Torque	τ	__	N
Posición Angular	q	__	Grados
Velocidad Angular	$\dot{q}$	__	grados·s^{-1}
Aceleración Angular	$\ddot{q}$	__	grados·s^{-2}

En donde se debe de cumplir con las condiciones (9) y (10):

$$A = \frac{1+\mu}{1-\mu} \tag{9}$$

$$0 < \mu < 1 \tag{10}$$

Por lo tanto la aproximación de orden fraccional aplicada al modelo (5) se expresa en (11).

$$\begin{bmatrix} s^{\mu}\tilde{q} \\ s^{\mu}\dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{q}(s) \\ (ml^2+I)^{-1}(\tau - b\dot{q}(s) - mgl_c sen(q(s))) \end{bmatrix} \tag{11}$$

Al sustituir (8) en (11) se obtiene (12).

$$\begin{bmatrix} (As+1)\tilde{q} \\ (As+1)\dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(s+A)\dot{q}(s) \\ (ml^2+I)^{-1}(S+A)(\tau - b\dot{q}(s) - mgl_c sen(q(s))) \end{bmatrix} \tag{12}$$

En este punto se propone un control de tipo proporcional derivativo [15] más compensación de gravedad en (13). Cabe mencionar que el control PD tiene una versión con redes neuronales [12], [16].

$$\tau = k_p\tilde{q} - k_v\dot{q}(s) + mgl_c sen(q(s)) \tag{13}$$

Al sustituir (13) en (12) y realizando el algebra indicada se obtiene una ecuación compacta con el apoyo de unas variables indicadas en (14), (15), (16) y (17). Y aplicando la transformada inversa de Laplace, el resultado es (18).

$$A_{11} = \frac{A^3(ml^2+I) + A^2(k_v+b) + Ak_p}{A^2(ml^2+I) + A(k_v+b) + k_p} \tag{14}$$

$$A_{12} = \frac{1-A}{A} \tag{15}$$

$$A_{21} = \frac{k_pA(1-A)}{A^2(ml^2+I) + A(k_v+b) + k_p} \tag{16}$$

$$A_{22} = \frac{A^2(k_v+b) + A(ml^2+I+k_p)}{A^2(ml^2+I) + A(k_v+b) + k_p} \tag{17}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{11}\tilde{q} + A_{12}\dot{q} \\ A_{21}\tilde{q} - A_{22}\dot{q} \end{bmatrix} \tag{18}$$

En este punto se propone una función candidata de Lyapunov (19):

$$V(\tilde{q},\dot{q}) = \frac{1}{2}k_1\tilde{q}^2 + \frac{1}{2}k_2\dot{q}^2 \tag{19}$$

Derivando la función candidata de Lyapunov con respecto al tiempo se encuentra a (20).

$$\frac{d}{dt}V(\tilde{q},\dot{q}) = k_1\tilde{q}\frac{d\tilde{q}}{dt} + k_2\dot{q}\frac{d\dot{q}}{dt} \tag{20}$$

Al sustituir (18) en (20) y realizando álgebra se desarrolla (21).

$$\frac{d}{dt}V(\tilde{q},\dot{q}) = -CAk_1\tilde{q}^2 - CDk_2\dot{q}^2 - (A-1)(k_1 + k_2k_pA^2)\tilde{q}\dot{q} \leq 0 \tag{21}$$

Para sustentar (21) se considera (22).

$$\frac{d}{dt}V(\tilde{q},\dot{q}) \leq -((A_{11}k_1)^{\frac{1}{2}}\tilde{q} + (A_{22}k_2)^{\frac{1}{2}}\dot{q})^2 \tag{22}$$

Al desarrollar el algebra indicada en (22) resulta (23) que completa la demostración de estabilidad de Lyapunov para el modelo de orden fraccional.

$$-(A-1)\left(k_1 + k_2k_pA^2\right)\tilde{q}\dot{q} \leq$$
$$\leq \sqrt{\left(k_1A^3(ml^2+I) + k_1A^2(k_v+b) + k_1A^2k_p\right)}$$
$$\sqrt{\left(k_2A\left(A^2(k_v+b) + A(ml^2+I+k_p)\right)\right)}\,\tilde{q}\dot{q} \tag{23}$$

La demostración presentada indica que los puntos de equilibrio del nuevo modelo presentado son indicados por (24).

$$\begin{bmatrix} \tilde{q} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}\Bigg|_{t\to\infty} \tag{24}$$

Con el resultado de la demostración de estabilidad es factible simular el modelo de orden fraccional, es decir se pueden escribir las ecuaciones en código de programación y simular la dinámica del manipulador de 1 GDL, (24) indica que se presentara un comportamiento convergente. La simulación se presenta más adelante, se continúa presentando el modelado de los robots de 2 y 3 GDL. En la Fig. 3 se indica un robot de 2 GDL en el cual los dos eslabones que lo integran presentan movimiento en un plano.

Los parámetros físicos del robot de 2GDL se presentan en la Tabla 3. El modelo Euler-Lagrange del robot 2GDL es mostrado en (25).

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}(q) & m_{12}(q) \\ m_{21}(q) & m_{22}(q) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} +$$
$$+ \begin{bmatrix} c_{11}(q,\dot{q}) & c_{12}(q,\dot{q}) \\ c_{21}(q,\dot{q}) & c_{22}(q,\dot{q}) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1(q) \\ g_2(q) \end{bmatrix} \tag{25}$$

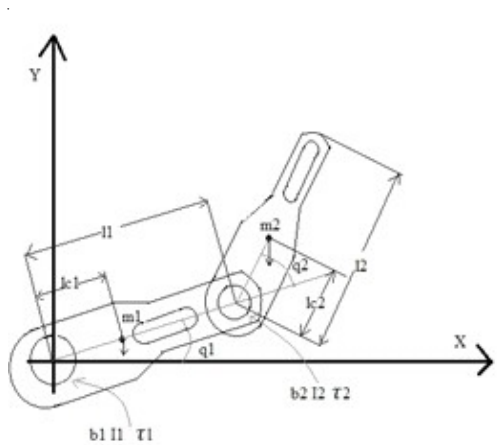


Fig. 3. Diagrama de un robot de 2 grados de libertad.

En términos de los parámetros físicos las ecuaciones de los elementos de las matrices se muestran desde (26) hasta (35).

$$m_{11}(q) = m_1 lc_1{}^2 + m_2 lc_2{}^2 + I_1 + I_2 + 2m_2 l_1 lc_2 \cos(q_2) \quad (26)$$

$$m_{12}(q) = m_2 lc_2{}^2 + I_2 + m_2 l_1 lc_2 \cos(q_2) \quad (27)$$

$$m_{12}(q) = m_2 lc_2{}^2 + I_2 + m_2 l_1 lc_2 \cos(q_2) \quad (28)$$

Tabla 3. Parámetros físicos del manipulador de 2 grados de libertad.

Parámetro	Eslabón 1	Eslabón 2	Unidades
Masa	m1	m2	kg
	0.1	0.05	
Longitud	L_1	L_2	m
	0.1	0.1	
Longitud de centro de masa	lc_1	lc_2	m
	0.05	0.05	
Inercia Rotacional	I_1	I_2	kg·m^2
	0.2	0.09	
Coeficiente de Fricción Viscosa	b1	b2	N·m·s^{-1}
	0.2	0.17	
Torque	$\tau 1$	$\tau 2$	N
Posición Angular	q_1	q_2	grados
Velocidad Angular	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_2$	grados·s^{-1}
Acceleración Angular	$\ddot{q}_1$	$\ddot{q}_2$	grados·s^{-2}

$$m_{22}(q) = m_2 lc_2{}^2 + I_2 \quad (29)$$

Debido a las propiedades de simetría de la matriz *M* (27) y (28) son idénticas.

La matriz *C*, también llamada matriz de Coriolis, presenta los términos (30) a (33), el efecto Coriolis se presenta cuando un objeto se mueve sobre otro objeto que va rotando por eso existe una dependencia importante del ángulo q_2.

$$c_{11}(q) = -2m_2 l_1 lc_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) \quad (30)$$

$$c_{12}(q) = -m_2 l_1 lc_2 \dot{q}_2 \sin(q_2) \quad (31)$$

$$c_{21}(q) = m_2 l_1 lc_2 \dot{q}_1 \sin(q_2) \quad (32)$$

$$c_{22}(q) = 0 \quad (33)$$

Y los términos debidos a la fuerza de gravedad se presentan en (34) y (35).

$$g_1(q) = m_1 glc_1 sin(q_1) + m_2 gl_1 sin(q_1) + m_2 glc_2 sin(q_1 + q_2) \quad (34)$$

$$g_2(q) = m_2 glc_2 sin(q_1 + q_2) \quad (35)$$

El modelo se maneja en términos de las variables de estado (36) a (39) y sustituyendo en (25) se obtiene (40).

$$q_1 = x_1 \quad (36)$$

$$q_2 = x_3 \quad (37)$$

$$\dot{q}_1 = x_2 = \dot{x}_1 \quad (38)$$

$$\dot{q}_2 = x_4 = \dot{x}_2 \quad (39)$$

Con el propósito de presentar una representación compacta se utiliza (41) para simplificar las matrices.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ x_4 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} m_{11}{}^{-1}(x) & m_{12}{}^{-1}(x) \\ m_{21}{}^{-1}(x) & m_{22}{}^{-1}(x) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{11}(x) & c_{12}(x) \\ c_{21}(x) & c_{22}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1(x) \\ g_2(x) \end{bmatrix} \right\} \quad (41)$$

En este punto se desarrolla álgebra y una mayor simplificación se obtiene con (42) y (43).

$$G_1 = m_{11}^{-1} f_1 + m_{12}^{-1} f_2 \quad (42)$$

$$G_2 = m_{21}^{-1} f_1 + m_{22}^{-1} f_2 \tag{43}$$

Como en el sistema de un solo eslabón, se aplica una aproximación de orden fraccional (44), y con un procedimiento análogo al mostrado para el robot de 1GDL, se obtiene finalmente el modelo de orden fraccional mostrado en (45).

$$\begin{bmatrix} s^{\mu} x_1 \\ s^{\mu} x_2 \\ s^{\mu} x_3 \\ s^{\mu} x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ G_1 \\ x_4 \\ G_2 \end{bmatrix} \tag{44}$$

En (44) se realiza una aproximación como la mostrada en (12), se lleva a cabo el álgebra y la simplificación de los términos. Finalmente el modelo de orden fraccional para el robot de 2GDL queda listo.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{T}{A^2}\right)\dot{G}_1 + \frac{T}{A}G_1 + T\left(\frac{A^2-1}{A^2}\right)x_{2t} + x_{1t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A}\right)\dot{G}_1 + TG_1 + x_{2t}(1-\frac{T}{A}) \\ \left(\frac{T}{A^2}\right)\dot{G}_2 + \frac{T}{A}G_2 + T\left(\frac{A^2-1}{A^2}\right)x_{4t} + x_{3t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A}\right)\dot{G}_2 + TG_2 + x_{4t}(1-\frac{T}{A}) \end{bmatrix} \tag{45}$$

En (45) hay que sustituir (46) donde $i = 1$ hasta $i = 2$.

$$\dot{G}_i \approx \frac{G_i(t-T) - G_i(t-2T)}{T} \tag{46}$$

Se pudo haber presentado un arreglo similar a (18) pero en este caso $(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22})$ serían matrices.

Y por último se presenta el modelo de orden fraccional para el robot de 3DGL en el cual el esquema para modelar es mostrado en la Fig. 4.

Los modelos para los robots de 3 GDL presentes en la literatura consultada no cubrían los requisitos del diseño de la Fig. 4 por lo que se procedió a realizar el modelado paso a paso, desde la cinemática directa, la cinemática inversa y Euler-Lagrange, los cálculos se repitieron para comprobar errores, una vez que ya se tenían ecuaciones correctas se aplicaron los parámetros indicados en la Tabla 4.

Para el robot 3GDL se toma como punto de partida el modelo de Euler-Lagrange mostrado en (47).

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_1\dot{q}_1 \\ b_2\dot{q}_2 \\ b_3\dot{q}_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} \right\} \tag{47}$$

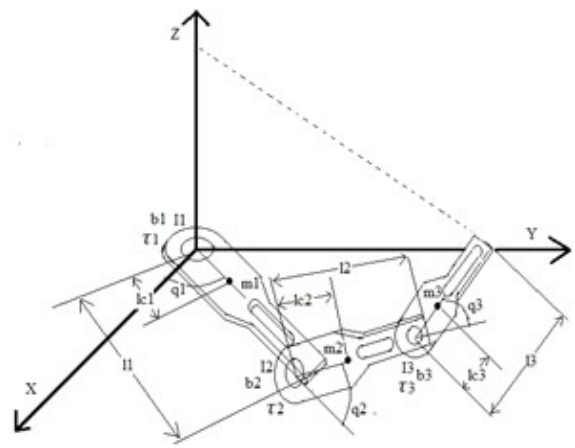


Fig. 4. Diagrama de un robot de 3 grados de libertad.

En la ecuación (47) la matriz inversa I es (48):

$$\begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}^{-1}$$

$$= \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} \mathrm{m}_{22}\mathrm{m}_{33} - \mathrm{m}_{23}\mathrm{m}_{32} & \mathrm{m}_{13}\mathrm{m}_{32} - \mathrm{m}_{12}\mathrm{m}_{33} & \mathrm{m}_{12}\mathrm{m}_{23} - \mathrm{m}_{13}\mathrm{m}_{22} \\ \mathrm{m}_{23}\mathrm{m}_{31} - \mathrm{m}_{21}\mathrm{m}_{33} & \mathrm{m}_{11}\mathrm{m}_{33} - \mathrm{m}_{13}\mathrm{m}_{31} & \mathrm{m}_{13}\mathrm{m}_{21} - \mathrm{m}_{11}\mathrm{m}_{23} \\ \mathrm{m}_{21}\mathrm{m}_{32} - \mathrm{m}_{22}\mathrm{m}_{31} & \mathrm{m}_{12}\mathrm{m}_{31} - \mathrm{m}_{11}\mathrm{m}_{32} & \mathrm{m}_{11}\mathrm{m}_{22} - \mathrm{m}_{12}\mathrm{m}_{21} \end{bmatrix} \tag{48}$$

Siendo el determinante (49):

$$\Delta = m_{11}(\mathrm{m}_{22}\mathrm{m}_{33} - \mathrm{m}_{23}\mathrm{m}_{32}) + m_{12}(\mathrm{m}_{23}\mathrm{m}_{31} - \mathrm{m}_{21}\mathrm{m}_{33}) + \\ + m_{13}(\mathrm{m}_{21}\mathrm{m}_{32} - \mathrm{m}_{22}\mathrm{m}_{31}) \tag{49}$$

Cada uno de los elementos de las matrices en términos de los parámetros físicos se presentan en (50) hasta (67). Debido a la simetría de la matriz M algunos términos de dicha matriz son iguales como se aprecia en (51), (52) y (54).

$$m_{11} = m_1 {lc_1}^2 + I_1 + m_2 {l_1}^2 + 2m_3 l_1 lc_2 \cos(q_2) + m_2 {lc_2}^2 cos^2(q_2) + I_2 + m_3 {l_1}^2 \\ + 2m_3 l_1 l_2 \cos(q_2) + 2m_3 l_1 lc_3 \cos(q_2 + q_3) + m_3 {l_2}^2 cos^2(q_2) \\ + 2m_3 l_2 lc_3 \cos(q_2)\cos(q_2 + q_3) + m_3 {lc_3}^2 cos^2(q_2 + q_3) + I_3 \tag{50}$$

$$m_{12} = m_{21} = I_2 + I_3 \tag{51}$$

$$m_{13} = m_{31} = I_3 \tag{52}$$

$$m_{22} = m_2 {lc_2}^2 + m_3 {l_2}^2 + m_3 {lc_1}^2 + I_2 + I_3 + 2m_3 l_2 lc_3 \, cos(q_3) \tag{53}$$

$$m_{23} = m_{32} = I_3 + m_3 l_2 lc_3 \cos(q_3) + m_3 {lc_3}^2 \tag{54}$$

$$m_{33} = I_3 + m_3 {lc_3}^2 \tag{55}$$

Tabla 4. Parámetros físicos del manipulador de 3 grados de libertad

Parámetros	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3	Unidades
Masa	m1	m2	m3	kg
	19.5	1.3	1.1	
Longitud	L_1	L_2	L_3	m
	1.2	1.1	1.1	
Longitud de centro de masa	lc1	lc2	lc3	m
	0.5	0.5	0.5	
Inercia Rotacional	I_1	I_2	I_3	kg·m^2
	4.15	0.37	0.271	
Coeficiente de fricción viscosa	b1	b2	b3	N·m·s^{-1}
	1.8	1.8	1.8	
Torque	$\tau 1$	$\tau 2$	$\tau 3$	N
Posición Angular	q_1	q_2	q_3	grados
Velocidad Angular	$\dot{q}_1$	$\dot{q}_3$	$\dot{q}_3$	grados·s^{-1}
Aceleración Angular	$\ddot{q}_1$	$\ddot{q}_2$	$\ddot{q}_3$	grados·s^{-2}

La matriz de Coriolis para el robot de 3 GDL presenta una dependencia de las posiciones angulares q_2 y q_3, en esta matriz no hay términos iguales.

$$c_{11} = -2m_2 l_1 lc_2 \dot{q}_2 \operatorname{sen}(q_2) - 2m_2 lc_2{}^2 \dot{q}_2 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2) - 2m_3 l_1 l_2 \dot{q}_2 \operatorname{sen}(q_2) - 2m_3 l_1 lc_3 \dot{q}_2 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \tag{56}$$

$$c_{12} = -2m_3 l_2{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2) - 2m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2 + q_3) - 2m_3 lc_3{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3)\, sen(q_2 + q_3) \tag{57}$$

$$c_{13} = -2m_3 l_1 lc_3 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) - 2\, m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \cos(q_2) - 2m_3 lc_3{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3)\, sen(q_2 + q_3) \tag{58}$$

$$c_{21} = m_3 l_1 l_2 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2) + m_3 l_1 lc_3 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) + m_3 l_2{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2) + 2m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2 + q_3) + 2m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2) \cos(q_2 + q_3) + 2m_3 lc_3{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \tag{59}$$

$$c_{22} = -2m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_3 \operatorname{sen}(q_3) \tag{60}$$

$$c_{23} = -m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_3 \operatorname{sen}(q_3) \tag{61}$$

$$c_{31} = m_3 l_1 lc_3 \dot{q}_1 \operatorname{sen}(q_2 + q_3) + m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_1 \cos(q_2) \operatorname{sen}(q_2 + q_3) + m_3 lc_3{}^2 \dot{q}_1 \cos(q_2 + q_3) \operatorname{sen}(q_2 + q_3) \tag{62}$$

$$c_{32} = -m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_3 \operatorname{sen}(q_3) \tag{63}$$

$$c_{33} = m_3 l_2 lc_3 \dot{q}_2 \operatorname{sen}(q_3) \tag{64}$$

Los términos dependientes de la fuerza de gravedad se presentan en los eslabones 2 y 3, en el eslabón 1 no hay una dependencia de la fuerza de gravedad ya que es paralelo a la superficie terrestre.

$$g_1 = 0 \tag{65}$$

$$g_2 = m_2 glc_2 \cos(q_2) + m_3 gl_2 \cos(q_2) + m_3 glc_3 \cos(q_2 + q_3) \tag{66}$$

$$g_3 = m_3 glc_3 \cos(q_2 + q_3) \tag{67}$$

Aplicando el mismo método para los sistemas de 1 y 2 GDL, el modelo dinámico de orden fraccional del robot de 3GDL es (68):

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{T}{A^2}\right)\dot{G_1} + \frac{T}{A}G_1 + T\left(\frac{A^2-1}{A^2}\right)x_{4t} + x_{1t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A^2}\right)\dot{G_2} + \frac{T}{A}G_2 + T\left(\frac{A^2-1}{A^2}\right)x_{5t} + x_{2t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A^2}\right)\dot{G_3} + \frac{T}{A}G_3 + T\left(\frac{A^2-1}{A^2}\right)x_{6t} + x_{3t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A}\right)\dot{G_1} + TG_1 + x_{4t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A}\right)\dot{G_2} + TG_2 + x_{5t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \\ \left(\frac{T}{A}\right)\dot{G_3} + TG_3 + x_{6t}\left(1-\frac{T}{A}\right) \end{bmatrix} \tag{68}$$

En (68) se aplican (69) y (70):

$$\begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & i_{13} \\ i_{21} & i_{22} & i_{23} \\ i_{31} & i_{32} & i_{33} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} kp_1(q_{d1}-q_1) - kv_1\dot{q_1} - c_{11}\dot{q_1} - c_{12}\dot{q_2} - c_{13}\dot{q_3} - b_1\dot{q_1} \\ kp_1(q_{d2}-q_2) - kv_2\dot{q_2} - c_{21}\dot{q_1} - c_{22}\dot{q_2} - c_{23}\dot{q_3} - b_2\dot{q_2} \\ kp_1(q_{d3}-q_3) - kv_3\dot{q_3} - c_{31}\dot{q_1} - c_{32}\dot{q_2} - c_{33}\dot{q_3} - b_3\dot{q_3} \end{bmatrix} \right\} \tag{69}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{G_1} \\ \dot{G_2} \\ \dot{G_3} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \frac{G_1 - G_{1_t}}{T} \\ \frac{G_2 - G_{2_t}}{T} \\ \frac{G_3 - G_{3_t}}{T} \end{bmatrix} \tag{70}$$

3. Resultados

En esta sección se comparan los modelos de orden entero con los desarrollados utilizando COF, en la Fig. 5 se muestra una gráfica de respuesta de un eslabón robótico de 1 GDL de orden entero y dos de orden fraccional, el orden de las derivadas fraccionarias es μ = 0.99 y μ = 0.95. Se aprecian gráficas muy similares, el error en estado estable es más notorio para los modelos de orden fraccional si el valor de μ es más pequeño esto es lo que se desea demostrar, se muestran también las gráficas de la velocidad del eslabón 1, las velocidades tienden a cero es decir a un valor de equilibrio. Como se observa en la Fig. 5 las respuestas de orden fraccional son más lentas que el modelo de orden entero, de hecho, si se desea simular un modelo de orden fraccional de alta velocidad de respuesta, entonces la aproximación en fracciones continuas (8) debe tener un mayor número de términos, entre más términos el ancho de banda del modelo de orden fraccional es más preciso [9]. Finalmente en esta simulación el ángulo deseado para q_1 y es de 90°.

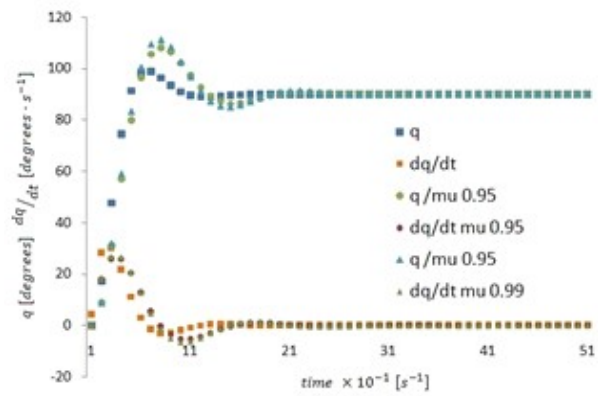


Fig. 5. Gráficas de respuesta de un robot de 1 GDL.

En la Fig. 6 se muestran gráficas de respuesta del eslabón 1 del robot de 2 GDL, las gráficas son la de orden entero y dos de orden fraccional, el orden de las derivadas fraccionarias son μ = 0.99 y μ =0.95. Las gráficas de orden fraccional muestran un error en estado estable más facil de observar, las velocidades tienden a cero es decir a un valor de equilibrio. En la simulación el ángulo deseado para q_1 y q_2 es de 10°.

En la Fig. 7 se muestra una gráfica de respuesta del eslabón 1 del robot de 3 GDL, las gráficas son la de orden entero y dos de orden fraccional, el orden de las derivadas fraccionarias son μ = 0.99 y μ = 0.95. las gráficas de orden fraccional muestran un error en estado estable más fácil de observar, las velocidades tienden a cero es decir a un valor de equilibrio. En la simulación el ángulo deseado para q_1 , q_2 y q_3 es de 5°. En las gráficas para el robot de 3 GDL.

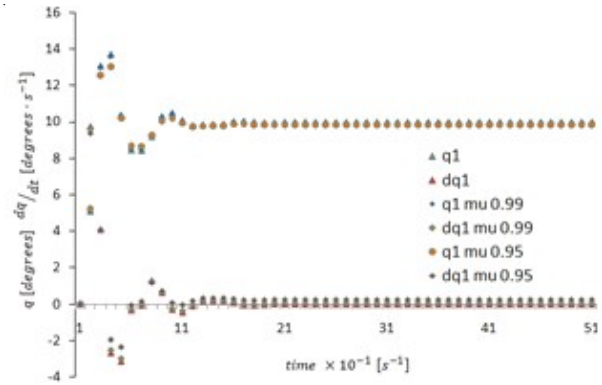


Fig. 6. Gráficas de respuesta del Eslabón 1 para el robot de 2 GDL.

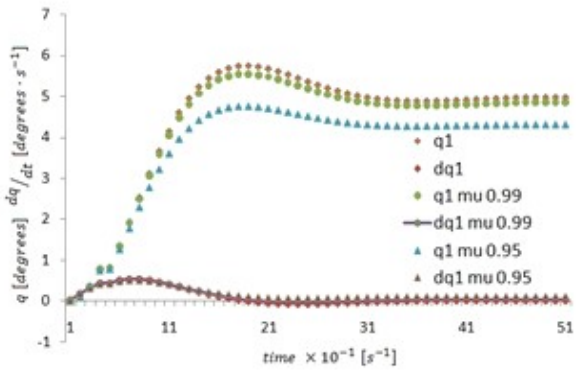


Fig. 7. Gráficas de respuesta del Eslabón 1 para el robot de 3 GDL.

Dentro de las aplicaciones de estos modelos y utilizando las ventajas de la tarjeta STM32L476 se procede a diseñar trayectorias para los modelos de 2 y 3 GDL, se diseñó una "H" "O" "L" "A", en el caso del modelo de 2 GDL se graficó esta trayectoria utilizando un osciloscopio, como se observa en la Fig. 8, ademas se diseñó una trayectoria "HOLA Dr CHUA" tambien desplegada en osciloscopio. En el caso del modelo de 3 GDL, la trayectoria "HOLA" se graficó en LabVIEW, esto se observaen la Fig. 10.

Las figuras 8 y 9 se obtuvieron utilizando el osciloscopio Tektronix DPO3032. Una fotografía con un saludo al Director del ITSPR se observa en la Fig. 9.

4. Conclusiones

Los resultados muestran que realizar un modelo de orden fraccional al modelo dinámico de un robot manipulador de eslabones rotacionales, aporta resultados convergentes cuando se desea alcanzar una posición o describir una trayectoria por la metodología de control punto a punto, de hecho el orden de la fracción debe ser cercano a uno lo que indica que

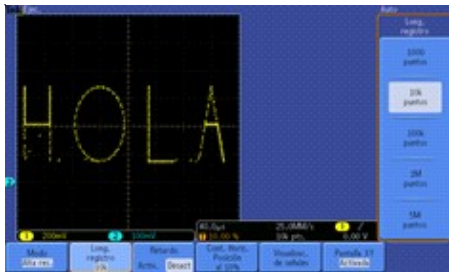


Fig. 8. Imagen de la salida en osciloscopio de la trayectoria "HOLA".

Fig. 9. Fotografía de la salida en osciloscopio de la trayectoria "HOLA DR CHUA".

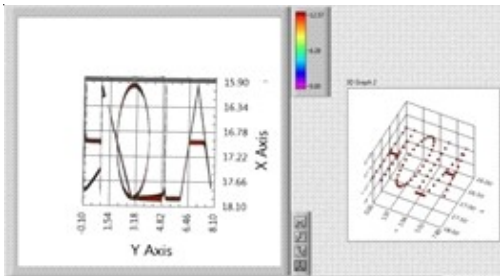


Fig. 10. Trayectoria "HOLA" en LabVIEW para el modelo Fraccional de 3 GDL.

la diferencia entre el modelo tradicional de orden entero y el modelo de orden fraccional no difieren de manera notable, dentro de las consideraciones del modelo de orden fraccional se encuentran los siguientes puntos:

1. Se logró mostrar que un modelo dinámico de orden fraccional cumple con el segundo criterio de estabilidad de Lyapunov, esto significa que la simulación del modelo presenta un comportamiento convergente.
2. Las gráficas de simulación muestran lo esperado, un error en estado estable debido al modelo de orden fraccional, esto implica que el modelo de orden fraccional es más acertado que su contraparte de orden entero.
3. El modelo de orden fraccional permite simular trayectorias complejas para los sistemas de 2 y 3 GDL las cuales se implementan en una tarjeta de desarrollo STM32L476 y se visualizan en osciloscopio.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Tecnológico Superior de Poza Rica, por su apoyo en el uso de equipo de laboratorio y en las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

Rerefencias

[1] J. F. Goméz-Aguilar, J. Rosales-García, J. R. Razo-Hernández, M. Guía-Calderón, "Fractional RC and LC Electrical Circuits," *Ingenieria Investigacion y Tecnología*, vol. 15, pp. 311-319, abril-junio 2015.

[2] B. Goodwine, K. Leyden, "Recent results in fractional-order modeling in multi-agent systems and linear friction welding", *IFAC-PaperOnLine*, vol. 48, pp. 380-381, 2015.

[3] I. Tejado, D. Valerio, P. Pires, J. Martins, "Fractional order human arm dynamics with variability analyses", *Mechatronics*, vol. 23, pp. 805-812, 2013.

[4] J. M. Rosario, D. Dumur, M. Tenreiro, "Analysis of fractional-order robot axis dynamics," *IFAC Procedings Volumes*, vol. 39, pp. 367-372, 2006.

[5] . Shalaby, M. El-Hossaing, B.Abo-Zalam, "Fractional Order modeling and control for under-actuated inverted pendulum," *Comunication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 74, pp. 97-121, 2019.

[6] L. Zhang, X. Hu, Z. Wang, F. Sun, G. D. David, "Fractional-Order modeling and state-of-Charge estimation for ultracapacitors", *Journal of Power Source*, vol. 314, pp. 28-34, 2016.

[7] X. Shi, Y. Chen, J. Huang, "Application of fractional-order active disturbance rejection controller on linear motion system," *Control Engineering Practice*, vol. 81, pp. 207-214, 2018.

[8] I. Ceron-Morales, F. Q. Gonzalez-Manzanilla, C. Muñiz-Montero, J. A. Arizaga-Silva,"Control PID de orden fraccional aplicado a un colector solar cilindroparabólico," *Visión Politécnica*, vol.13, núm. 1, pp, 23-27, enero-junio, 2018.

[9] B.T. Krishna, "Studies on fractional order differentiators and integrators: A survey", *Signal processing*, vol. 91, pp. 246-386, marzo, 2011.

[10] H. Sun, Y. Zhang, D. Baleanu, W. Chen, Y, Chen, "A new collection of real-world applications of fractional calculus in science and engineering", *Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 64, pp. 213, 2018.

[11] J.A. Flores-Ordeñana, I. Ceron-Morales, C. Muñiz-Montero, L. A. Sanchez-Gaspariano, E. Tlelo-Cuautle, "Implementacion de controladores PID fraccionales en las plataformas STM32.Discovery y Arduino a partir de SIMULINK/MATLAB: parte 1," *Visión Politécnica*, vol. 12, núm. 2, pp. 8-12, 2017.

[12] I. Ceron-Morales, C. Muñiz-Montero, E. Tlelo-Cuautle, "Metodología didáctica de control con redes neuronales y FOPID al modelo dinámico de un robot 2GDL en Arduino y STM32," XVII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, Ciudad de México, México, 2018.

[13] I. Ceron-Morales, J. F. Herver-Acuña, S. J. Castillo-Castillo, W.A. Cortez-Martínez, "Metodología de programación de trayectorias de un robot de 2GDL utilizando la tarjeta STM32L476RG", *Sinergia Mecatrónica*, Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C., pp. 144-158, 2019.

[14] B. F. Voronin, "La aplicación del método de fragmentación en la enseñanza de cinemática de mecanismos," *Científica*, vol. 18, núm. 1, pp. 21-29, enero-marzo, 2014.

[15] D. Zhang, B. Wei, "A review on model reference adaptive control of robotic manipulators," *Annual Reviews in Control*, vol. 43, pp. 188-198. 2017.

[16] M. Villaseñor-Aguilar, A. Ramírez-Agundis, J. A. Padilla-Medina, H. Orozco-Mendoza, "Control de estabilidad de un manipulador planar paralelo 3RRR utilizando redes neuronales," *Científica*, vol. 15, núm. 3, pp.107-115, julio-septiembre, 2011.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a08

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 153-159, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Obtención y caracterización de capas de elevada dureza sobre fundiciones nodulares, mediante técnicas de difusión termorreactiva*

Dayi Gilberto **Agredo-Díaz**[1]
Arturo **Barba-Pingarrón**[2]
Daniel **Sánchez-Ruiz**[2]
Jesús Rafael **González-Parra**[2]
Raúl Gilberto **Valdez-Navarro**[2]
Jhon Jairo **Olaya-Florez**[1]
Carlos Alberto **González-Rodriguez**[3]
Alba **Covelo-Villar**[2]
Miguel Ángel **Hernández-Gallegos**[2]
Irma **Angarita-Moncaleano**[1]

[1]Universidad Nacional de Colombia
Sede Bogotá, Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.
Bogotá.
COLOMBIA
[2]Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Mecánica e Industrial
Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA),
Ciudad de México.
MÉXICO
[3]Universidad Politécnica del Valle de México.
MÉXICO

correos electrónicos (emails):
dgagredod@unal.edu.co, arbapin5@gmail.com
gravemindflood117@gmail.com, rafael.parra@yandex.com
raulgvaldez@hotmail.com, jjolayaf@unal.edu.co
gorc74@yahoo.com, acovelov@gmail.com
mahg22@yahoo.com, iangaritam@unal.edu.co

Recibido 31-01-2020, aceptado 27-04-2020.

Resumen

En esta investigación se describen los trabajos llevados a cabo para generar capas, con presencia importante, principalmente, de carburo de niobio de elevada dureza, sobre una fundición nodular (FN) de matriz perlítica, mediante técnicas de difusión termorreactiva (TRD, por sus siglas en inglés). Los procesos se realizaron empleando un baño de bórax a 950 y 1025°C, durante tiempos de 4 y 6 horas. Los sustratos se caracterizaron mediante espectroscopia de emisión atómica, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Las capas depositadas, asimismo, se caracterizaron empleando ensayos de microdureza Vickers, microscopía electrónica de barrido, espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS por sus siglas en inglés) y difracción de rayos X (DRX). Se alcanzan valores de dureza de los recubrimientos del orden de 2600 Vickers con espesores cercanos a 25 µm. El análisis EDS muestra principalmente la presencia de Fe, Nb, y V. El proceso representa una alternativa de menor costo y ambientalmente más amigable que tecnologías como la de CVD y se considera una opción atractiva para dotar, entre otras características, de mayor resistencia al desgaste a la fundición nodular.

Palabras clave: carburo de niobio, difusión termorreactiva, DRX, fundición nodular, microscopía electrónica de barrido.

Abstract
(Obtaining and characterization of high hardness layers on Ductile Irons by means of Thermoreactive Diffusion techniques)

This research describes the work carried out to generate layers, with a significant presence of high hardness niobium carbide, on a pearlitic matrix ductile iron, by means of thermoreactive diffusion techniques (TRD). The processes were carried out using a borax bath at 950 and 1025°C for 4 and 6 hours. The substrates were characterized by atomic emission spectroscopy, optical microscopy, scanning electron microscopy. The deposited layers were characterized by vickers microhardness tests, scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction. The hardness values of coatings of the order of 2600 Vickers with thickness close to 25 µm, where the EDS analysis shows mainly the presence of Fe, Nb and V. The process represents a lower cost and more environmentally friendly alternative to technologies such as CVD and is considered an attractive option to provide greater wear resistance (and other characteristics), to ductile iron.

Index terms: ductile iron, niobium carbide, scanning electron microscopy, thermoreactive diffusion, XRD.

1. Introducción

Las fundiciones nodulares reúnen una serie de características que las hacen muy atractivas en un extenso campo de

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

aplicaciones. El grafito libre que presentan, en forma de nódulos, otorga propiedades de alta conductividad térmica, características de autolubricación, capacidad para amortiguar de manera muy eficiente las vibraciones mecánicas, todo lo anterior unido a la posibilidad de modificar la matriz mediante tratamiento térmico, lo que permite satisfacer, cada vez más, diversos y exigentes requerimientos de la industria [1], [2]. Adicionalmente, las fundiciones nodulares poseen una densidad ligeramente menor que la de los aceros, pudiéndose fundir a temperaturas más bajas, lo cual conlleva una gran ventaja con respecto a materiales convencionales, reduciendo la energía necesaria para su procesamiento.

En años recientes, se ha conseguido mejorar aún más el desempeño de estos materiales, a través de la aplicación de un tratamiento térmico de austempering, por medio del cual se modifica su microestructura para generar una combinación de ausferrita y nódulos de grafito, lo que se conoce como fundición nodular austemperizada, (ADI, por sus siglas en inglés). Ello ha permitido mejorar, en mayor medida aún, sus propiedades mecánicas, logrando un muy buen balance de resistencia mecánica conjuntada con una buena tenacidad, lo que le ha abierto nuevas opciones de aplicación en varios campos. Incluso, las ADI se han venido utilizando en sustitución de algunos aceros aleados y de varias aleaciones de aluminio [3], [4] .

Por su parte, los tratamientos de difusión termorreactiva constituyen una variante, proveniente del campo de los tratamientos termoquímicos, por medio de la cual, es posible formar capas conteniendo, prioritariamente, carburos (y a veces carbonitruros), de elementos de alta afinidad por el carbono, tales como el vanadio o el niobio, compuestos que son de elevada dureza, con el propósito de colaborar a brindar una mayor microdureza, una elevada resistencia al desgaste y mejores propiedades superficiales [5], [6], [7].

A partir de lo anterior, en este trabajo se presentan los resultados obtenidos al generar capas, mediante la aplicación de técnicas de difusión termorreactiva, sobre una fundición nodular obteniendo capas, fundamentalmente, de NbC. Las capas logradas fueron caracterizadas empleando técnicas de microscopía electrónica de barrido, análisis químico utilizando una microsonda de EDS, ensayos de microdureza y evaluación estructural usando difracción de rayos X, para la identificación de los compuestos y fases formadas.

2. Metodología

Para la obtención del recubrimiento se prepararon piezas de 2.5 x 2.5 cm las cuales fueron sometidas a procesos de limpieza mediante etapas alcalinas y ácidas, más una limpieza ultrasónica en acetona y fueron colocadas en un horno en el que previamente se encontraba bórax fundido, en un recipiente dispuesto para el tratamiento, a temperaturas de 950 y 1025°C, durante tiempos de 4 y 6 horas, respectivamente, con contenido de ferroniobio y ferrovanadio (8% en peso de cada una de las ferroaleaciones) en el baño y bórax, efectuándose un posterior enfriamiento al aire hasta temperatura ambiente.

La composición de la Fundición Nodular utilizada se obtuvo mediante espectroscopia de emisión atómica, en tanto la composición semicuantitativa del recubrimiento se determinó a través de EDS en un microscopio electrónico de barrido Philips XL20 utilizando una microsonda de EDS acoplada al microscopio. La preparación y caracterización metalográfica del sustrato se realizó siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM E-3 [8], empleando etapas de lijado con papel de SiC desde la lija número 200 hasta la lija número 1000, un posterior pulido con alúmina de 3 y 0.5 µm, y un ataque químico con nital al 2%, seguido de la observación mediante microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido (SEM). La caracterización morfológica de la capa se llevó a cabo mediante SEM, realizándose, asimismo, la medición del espesor de la capa promedio obtenida.

La caracterización estructural se realizó mediante difracción de rayos X en un difractómetro PanAlytical X'Pert Pro, operando a 45 kV, 40 mA, usando una radiación monocromática de Cu, con una longitud de onda de 1,54 Å, y un tamaño de paso de 0,02° a un tiempo de 40 s por paso.

La dureza de las capas es obtenida mediante la aplicación del ensayo de microdureza bajo la norma ASTM E-384 [9] en un microdurómetro digital modelo HVS-1000, se usa una carga de 50 g y un tiempo de 10 s.

3. Resultados y discusión

La composición elemental de la FN se muestra en la tabla 1, esta presenta un contenido de C de 3.606 % y Si de 2.505%, que representan valores típicos para un material de este tipo. La microestructura del material en estado de entrega (EE) permite evidenciar la distribución de fases presentes en el material, el cual está constituido por una matriz perlítica con la presencia de la fase ferrita y nódulos de grafito, estas mismas características son mostradas en los estudios consignados en [10], condición que se puede evidenciar en la figura 1. En la figura 2 se muestra, en una imagen de microscopía electrónica de barrido, una magnificación que permite evidenciar de forma más clara la presencia mayoritaria de la perlita y como la ferrita aparece rodeando a los nódulos de grafito en lo que se conoce como "morfología ojo de buey".

Tabla 1. Composición elemental del material de estudio. Porcentaje en peso.

%Fe	% C	% Si	% Mn	% P
92.7	3.606	2.505	0.521	0.017

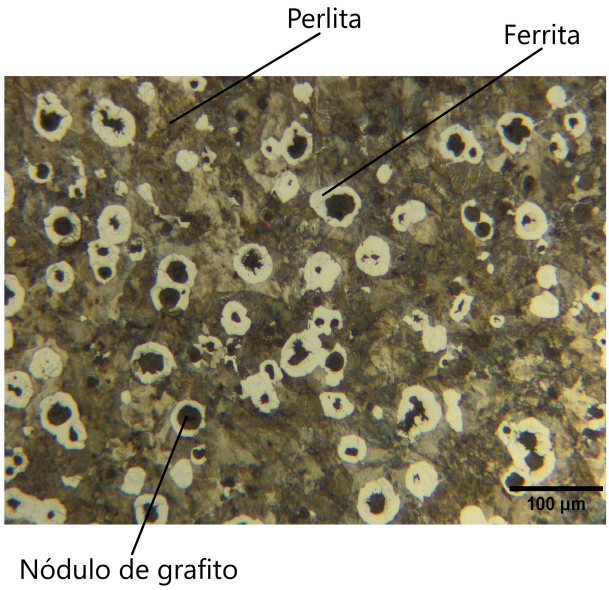


Fig. 1. Microestructura de la fundición nodular en estado de entrega mediante microscopia óptica.

La figura 3 muestra la obtención de una monocapa que crece de forma perpendicular a la superficie de la fundición, se evidencia un recubrimiento homogéneo, compacto y con buena

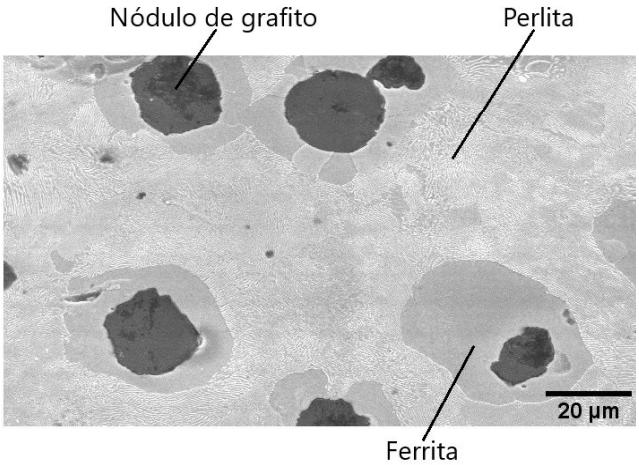


Fig. 2. Microestructura del material en estado de entrega mediante SEM con electrones secundarios (SE).

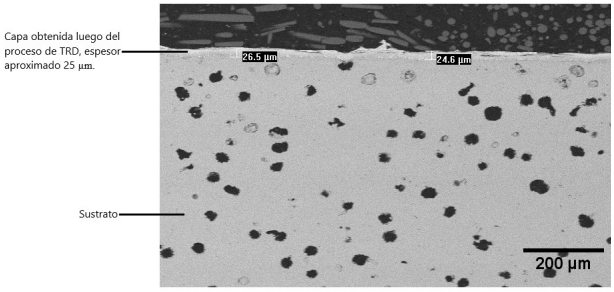


Fig. 3. Imagen de microscopía electrónica de barrido de la capa obtenida mediante difusión termorreactiva, sobre una fundición nodular (SEM, electrones retrodispersados (BSE)). La capa es homogénea en espesor.

adherencia al sustrato [6], donde el crecimiento de la capa está controlado por la difusión de átomos de carbono en la capa del carburo que se está formando y, a su vez, por la difusión de los átomos del metal en la capa de carburo, estas condiciones hacen que se propicie la formación de una capa de alta adherencia [11]. Se destaca la obtención de un espesor del orden de 25 ±1 µm, lo cual es congruente con lo obtenido en [12], [13], [14], [21].

La figura 4 muestra el microanálisis de EDS para la capa, se evidencia la presencia mayoritaria de hierro, niobio y vanadio producto de las ferroaleaciones, la aparición de C es un indicador inicial de la posible formación de carburos, lo cual es proveniente de la elevada afinidad del Nb y el V por el C, a su vez la presencia de boro proviene del baño de bórax usado en el tratamiento. Estos resultados son comparables a los obtenidos en las investigaciones realizadas por Castillejo y colaboradores [15].

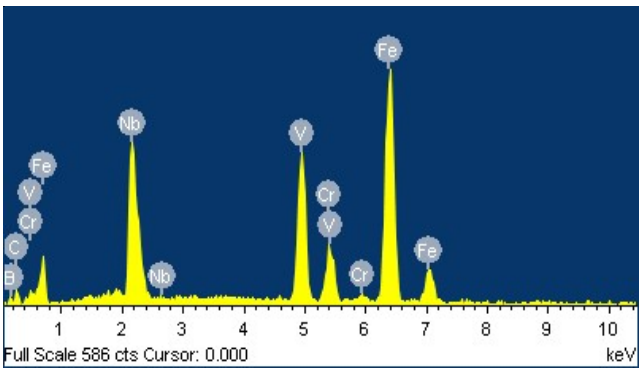


Fig. 4. Espectro de EDS obtenido para la capa generada sobre FN. Destacan la presencia de Nb y V, así como Fe, B y Cr.

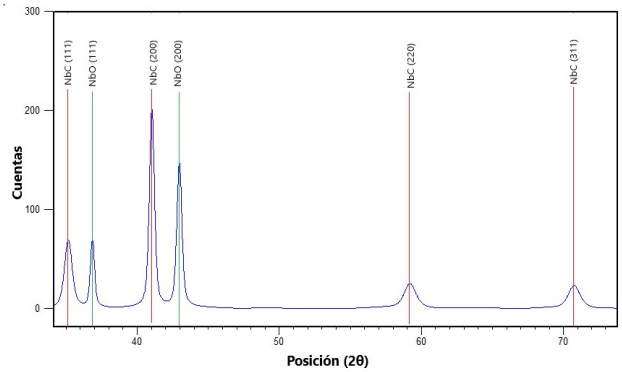


Fig. 5. Patrón de difracción de rayos X para la capa obtenida sobre una fundición nodular, mediante difusión termorreactiva. Se observa claramente la presencia del carburo de niobio y de óxido de niobio en la muestra tratada.

La figura 5 muestra el patrón de difracción de las capas logradas. Se verifica la presencia de NbC según el patrón de referencia ICDD 01-074-1222 y NbO según el patrón de referencia ICDD 01-078-0642, ambos con estructura cristalina cúbica. La posición angular (2θ), con su correspondiente plano se muestran en la tabla 2. Las mayores intensidades corresponden a las orientaciones de los planos (200) y (111), y una presencia menor de las orientaciones (220) y (311) del NbC. La formación de óxido de niobio (NbO) está ligado a la reacción que ocurre a las elevadas temperaturas del proceso, estudios confirman que a temperaturas cercanas a los 1000°C, el elemento formador de carburo se oxida rápidamente lo que propicia la formación de óxidos del metal de las ferroaleaciones, esto se reporta en [11] y de manera particular en [16] y [17].

La formación de estas capas con la estructura cristalina cúbica mencionada, asimismo, se atribuye a la elevada afinidad del niobio por el carbono, como se reporta también en [16], [17], en conjunto con un adecuado control de los parámetros termodinámicos que intervienen en el proceso de crecimiento de la capa [4], [6] y [15].

Tabla 2. Posición de los picos para el NbC y NbO.

Compuesto	Plano (hkl)	Angulo 2Θ	
		Teórico	Experimental
NbC	111	35.3	35.12
	200	40.99	40.99
	220	59.36	59.14
	311	70.99	70.68
NbO	111	36.95	36.82
	311	42.93	42.93

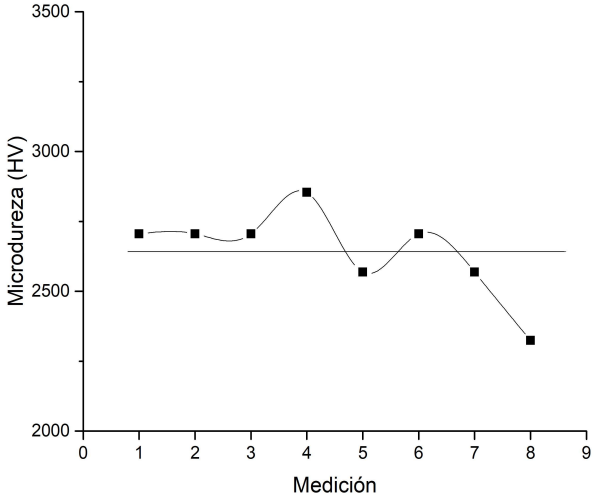


Fig. 6. Microdureza de la capa obtenida mediante TRD sobre la fundición nodulara.

La figura 6 presenta el resultado producido a través de la aplicación del ensayo de microdureza sobre diversas zonas de las capas obtenidas, y los resultados reportados (del orden de 2600 Vickers) estarían en concordancia con la formación de Carburo de Niobio y con resultados reportados en las referencias [15], [12], [18], [19], [16], [17], [20]. En un siguiente trabajo se evaluará el efecto de estos tratamientos, en primera instancia, en la resistencia al desgaste, la cual se espera pueda mejorar con la presencia de estas capas.

4. Conclusiones

Ha sido posible obtener capas de elevada dureza, sobre una fundición nodular, mediante tecnologías de difusión termorreactiva, empleando un baño de bórax, con adición de pequeñas cantidades de ferroaleaciones, conteniendo elementos que son fuertes formadores de carburos, tales como niobio o vanadio, siendo esta una buena alternativa para la protección de componentes sometidos a condiciones de desgaste.

Se obtiene una monocapa del orden de 25 micrómetros de espesor, con crecimiento normal a la superficie del sustrato, de buena homogeneidad, compacta y con buena adherencia. El microanálisis de EDS muestra la presencia de cantidades significativas de hierro, niobio, y vanadio en la capa, obteniendo valores de microdureza del orden de los 2600 HV, lo cual va ligado a la formación de NbC, esto se confirmó mediante difracción de rayos X.

La presencia NbO en menor cantidad está dada por el elemento formador del carburo que se oxida rápidamente, este se une al Nb contenido en la ferroaleación y propicia la formación del óxido.

Un siguiente trabajo incluirá la evaluación de la resistencia al desgaste y a la corrosión, en diversos medios, de las capas logradas.

Agradecimientos

Los autores del Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, agradecen el apoyo otorgado para la realización de esta investigación, por parte de la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, a través de los Proyectos PAPIIT IT101318 "Desarrollo de Tecnologías de Superficie para la Optimización de Componentes y Sistemas" y PAPIME PE100218 "Programa para la Actualización y Mejora de la Enseñanza y Aprendizaje de Temas de Materiales, Manufactura e Ingeniería de Superficies a Estudiantes de Ingeniería".

Referencias

[1] R. Castillo, V. Bermont, V. Martínez, "Relaciones entre la microestructura y las propiedades mecánicas en fundiciones nodulares: Revision bibliográfica," *Rev. Metal*., vol. 35, núm. 5, pp. 329-334, 1999.

[2] D. G. Agredo Diaz, A. Barba Pingarrón, J. R. Gonzalez Parra, J. J. Olaya Florez, R. G. Valdez Navarro, "Evaluación de la resistencia a la corrosión de una fundición nodular recubierta por proyección térmica," *Memoria del congreso Internacional de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica*, (CIMM/CIIMA) 2019, p. 121.

[3] T. Arai, "The thermo-reactive deposition and diffusion process for coating steels to improve wear resistance. Capítulo 19", en *Thermochemical Surface Engineering of Steels: Woodhead Publishing Limited*, 2015, pp. 703-736.

[4] J. R. Davis, "Thermal Diffusion Process," *Encycl. Tribol.*, pp. 3586-3586, 2013.

[5] F. Castillejo, D. Marulanda, J. Olaya, "Estudio de recubrimientos de carburos ternarios de niobio-vanadio producidos sobre acero D2 usando la técnica de deposición por difusión termorreactiva," *Rev. Latinoam. Metal. y Mater.*, vol. 34, núm. 2, pp. 230-239, 2014.

[6] F. E. Castillejo Nieto, J. J. Olaya Flórez, "Recubrimientos de VC y NBC producidos por DRT: Tecnología económica, eficiente y ambientalmente limpia," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 22, núm. 1, p. 95, 2012.

[7] M. Aghaie-Khafri and F. Fazlalipour, "Vanadium carbide coatings on die steel deposited by the thermo-reactive diffusion technique," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 69, núm. 10, pp. 2465-2470, 2008.

[8] ASTM, "E3 Preparation of Metallographic Specimens," *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. 11, núm. Reapproved 2017, pp. 1-17, 2017.

[9] ASTM, *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. 2008, pp. 281-293.

[10] C. Labrecque, M. Gagné, "Ductile Iron: Fifty years of continuous development," *Can. Metall. Q.*, vol. 37, núm. 5, pp. 343-378, 1998.

[11] F. E. Castillejo Nieto, *Recubrimientos de Carburos Ternarios Depositados con la Técnica TRD Rec*, Universidad Nacional de Colombia, 2013.

[12] F. A. P. Fernandes, J. Gallego, C. A. Picon, G. Tremiliosi Filho, L. C. Casteletti, "Wear and corrosion of niobium carbide coated AISI 52100 bearing steel," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 279, pp. 112-117, 2015.

[13] X. Liu, H. Wang, D. Li, Y. Wu, "Study on kinetics of carbide coating growth by thermal diffusion process," *Surf. Coatings Technol*., vol. 201, núm. 6, pp. 2414-2418, 2006.

[14] C. Y. Wei, F. S. Chen, "Thermoreactive deposition/diffusion coating of chromium carbide by contact-free method," *Mater. Chem. Phys*., vol. 91, núm. 1, pp. 192-199, 2005.

[15] F. E. Castillejo-Nieto, J. J. Olaya-Florez, J. E. Alfonso, "Wear resistance of vanadium-niobium carbide layers grown via TRD," *Dyna*, vol. 82, núm. 193, pp. 104-109, 2015.

[16] A. Bedolla-Jacuinde, "Niobium in Cast Irons," en *Progress in Metallic Alloys in IntechOpen*, 2016, pp. 187-219.

[17] C. Soares, F. E. Mariani, L. C. Casteletti, A. N. Lombardi, G. E. Totten, "Characterization of Niobium Carbide Layers Produced in Ductile Cast Iron Using Thermo-Reactive Treatments," *Mater. Perform. Charact*., vol. 6, núm. 4, p. 20160093, 2017.

[18] M. Ariati, W. N. Putra, A. Aryowiweko, "Effect of FeCr/FeV Ratio During Thermo-Reactive Deposition(TRD) Process on Mechanical Properties and Characteristics of Carbide Layer of SUJ2 Steel," *Mater. Today Proc.*, vol. 17, pp. 1736-1742, 2019.

[19] R. M. Triani, F. E. Mariani, L. F. De Assis Gomes, P. G. B. De Oliveira, G. E. Totten, L. C. Casteletti, "Improvement of the tribological characteristics of AISI 8620, 8640 and 52100 steels through thermo-reactive treatments," *Lubricants*, vol. 7, núm. 8, 2019.

[20] O. Susarrey, A. López, L. Morales, D. Samayoa, J. Martínez, G. Montes de Oca, O. Flores, I. Campos, J. Silva, A. Balankin, "Tópicos selectos de mecánica de la fractura," *Científica*, vol. 7, núm. 3, julio-septiembre 2003. pp. 181-200.

[21] I. Campos, R. Torres, G. Ramírez, L. Zuñiga, M. E. Sánchez, "Evaluación de la movilidad del boro en aceros al carbono y herramienta en el proceso de borurización en pasta," *Científica*, vol. 10, núm. 3, 2006.

Portal de Portales Latindex

El Portal de Portales Latindex (PPL) proporciona acceso a los contenidos y textos completos de revistas académicas disponibles en hemerotecas digitales de América Latina, el Caribe, España y Portugal, adheridas al movimiento de acceso abierto

más de 1 542 783 artículos indexados

El objetivo de este portal es difundir el conocimiento científico que se publica en la región iberoamericana. El desarrollo informático utiliza el OAI Harvester2 desarrollado por el Public Knowledge Project (PKP) basado en el protocolo OAI-PMH.

www.latindex.ppl.unam.mx

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a09

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 161-170, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Resistencia a la compresión de la laja tipo *salmón* procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México*

Adolfo Manuel **Morales-Tassinari**
Emanuel **Gómez-Alonso**
Moisés **Zárate-Reyes**

Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez
Ingeniería Mecánica
Av. Tecnológico s/n., Col. Barrio San Sebastián Sección Primera, CP. 74690, Tepexi de Rodríguez, Puebla.
MÉXICO

correo electrónico (email):
tassinari.adolfo1973@gmail.com

Recibido 13-02-2020, aceptado 25-05-2020.

Resumen

El estudio tiene como propósito determinar la resistencia a la compresión de la laja tipo Salmón procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México. Para lograr esto, se desarrollaron ensayos de compresión uniaxial siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C170/C170M-16 Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. La empresa Mármoles Gómez cortó 24 probetas cúbicas de esta piedra con dimensión de 50±0.5 mm en cada lado. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ciencias e Investigación en Materiales (LACIIM) del Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol del Estado de Puebla (CECOTIMEP) perteneciente al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez (ITSTR) del Tecnológico Nacional de México (TecNM). 12 probetas fueron secadas en horno a temperatura de 60°C durante 48 horas obteniendo peso seco constante; otras 12 probetas fueron saturadas en agua destilada a temperatura ambiente durante 48 horas obteniendo peso saturado constante. Se realizaron ensayos de compresión uniaxial en: 6 probetas secas con carga paralela a la veta, 6 probetas secas con carga perpendicular a la veta, 6 probetas saturadas con carga paralela a la veta y 6 probetas saturadas con carga perpendicular a la veta. La velocidad del ensayo de compresión uniaxial fue de 0.5 MPa/s. Los resultados muestran que la laja tipo Salmón tiene una resistencia a la compresión promedio de 56.35 MPa. En conclusión, la laja tipo *salmón* de esta localidad es recomendada para usos como columnas para mesas, patas para sillas y pedestales para lavabos en casa-habitación.

Palabras clave: caracterización mecánica, columnas, laja tipo *salmón* , ensayo de compresión uniaxial, resistencia a la compresión.

Abstract
(Compressive strength of the slate type Salmón from San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, Mexico)

This study has the purpose to determine the compressive strength of the slate rock type Salmón get from San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, Mexico. In order to achieve this, uniaxial compression test were developed following the procedure described in of ASTM C170/C170M-16 Standard Test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. The company Mármoles Gómez cut 24 cubic samples of this stone with a dimension of 50±0.5 mm on each side. The tests were carried out at the Laboratorio de Ciencias e Investigación en Materiales (LACIIM) of the Centro de Competitividad y Tecnología para la Industria del Mármol del Estado de Puebla (CECOTIMEP) belonging to the Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez (ITSTR) of the Tecnológico Nacional de México (TecNM). 12 specimens were oven dried at a temperature of 60°C for 48 hours obtaining constant dry weight; another 12 specimens were saturated in distilled water at room temperature for 48 hours obtaining constant saturated weight. Uniaxial compression tests were performed: 6 dry specimens aligned parallel load to the vein, 6 dry specimens loaded perpendicular to the vein, 6 saturated specimens aligned parallel to the vein, and 6 saturated specimens loaded perpendicular to the vein. The speed of the uniaxial compression test was 0.5 MPa/s. The result shows that the slate rock type *salmón* has an average compressive strength of 56.35 MPa. In conclusion, the slate rock type Salmón of this town is recommended for uses as columns for tables, legs for chairs and pedestals for washbowls in house-room.

Index terms: columns, compressive strength, mechanical characterization, slate rock type Salmon, uniaxial compression.

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

1. Introducción

Las rocas son agregados naturales duros y compactos de partículas minerales con fuertes uniones cohesivas permanentes, habitualmente se consideran un sistema continuo [1]. Geológicamente, las rocas se catalogan en: a) ígneas, se producen cuando el magma se enfría y se solidifica; b) sedimentarias, constituidas por partículas y sedimentos a través de la meteorización de otras piedras, la aglomeración de material biológico, la precipitación de sustancias químicas o bioquímicas, o un conjunto de ellas; c) metamórficas, que experimentan modificaciones en su estructura y mineralogía atribuida a la temperatura y presión a grandes profundidades [2]. En este sentido, la laja o pizarra es una roca metamórfica microcristalina comúnmente derivada del esquisto y compuesta por mica, clorita y cuarzo; así, los minerales micáceos tienen una orientación subparalela y, por lo tanto, imparten una fuerte escisión a la roca que permite que esta última se divida en láminas delgadas pero resistentes [3].

La laja se origina casi siempre por el metamorfismo en grado bajo de lutitas y pelitas; con menor frecuencia, producidas por el metamorfismo de las cenizas volcánicas [4]. La laja contiene una textura foliada densa y, como esta roca se divide a lo largo de la dirección de la escisión pizarrosa, debilita su resistencia a la erosión y a la intemperie [5]. Así, la laja de grado arquitectónico debe de estar libre de grietas, costuras u otros rasgos que puedan afectar su integridad estructural o función; además, las variaciones características de color inherentes de la cantera de la que se obtiene son aceptables [6]. Las explotaciones de la laja se realizan a cielo abierto mediante desmonte con maquinaría, perforación y voladura; de esta forma, la laja se separa con cuñas y otras herramientas clasificándose por tamaños, grosores y, en ciertos casos, se cortan y dimensionan empleando discos diamantados [7]. Los colores de la laja son variados desde el gris y ocre hasta el marrón; además, de colores azules, rojos, negros y verdes, según la incidencia de óxidos de fierro, manganeso y otros minerales.

Fig. 1. Cantera de laja tipo salmón.

Fig. 2. Superficie de la laja tipo salmón.

En la localidad de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México, existen canteras de laja tipo Salmón que es una roca de color salmón con vetas obscuras, y que se comercializan para fachadas exteriores. En la Fig. 1 se observa una cantera de laja tipo Salmón en dicha localidad; mientras que en la Fig. 2 se observa el aspecto superficial de la laja tipo *salmón*.

Los ensayos de caracterización evalúan la ventaja que tiene una roca para una aplicación específica [8]; por ello, para obtener las características mecánicas de una roca se caracterizan el comportamiento mecánico y de deformaciones, donde estas propiedades mecánicas permiten representar la resistencia a: tensión, compresión, flexión y choque [9]. En este sentido, la resistencia a la compresión en una roca establece la fuerza a compresión máxima que resiste el material sin aplastarse ni deformarse más de lo permitido [8]; por ello, una prueba muy empleada en laboratorio para obtener la resistencia a la compresión es la prueba de compresión uniaxial, que se basa en emplear una fuerza de manera axial y a compresión a través de una máquina sobre un área específica de una probeta cúbica o cilíndrica.

Diversos estudios internacionales han determinado la resistencia a la compresión de diversos tipos de rocas [10], [11], [12], [13], [14], [15]; cabe mencionar que, el conocimiento de esta resistencia a la compresión le otorga ventaja a la indus-

tria de la construcción para el cumplimiento de estándares. Además, en México también se han llevado a cabo estudios para determinar la resistencia a la compresión de diversas rocas [16], [17], [18], [19], [20], [21]. En la Tabla 1, se muestran los valores de la resistencia a la compresión de diversos tipos de rocas internacionales y nacionales.

De manera que este artículo tiene la finalidad de presentar los resultados de la resistencia a la compresión de la laja tipo *salmón* de la localidad de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México, a través de la prueba de compresión uniaxial aplicando la metodología de la norma ASTM C170/C170M-16 *Standard Test Method for Compressive Strength*, la cual consiste en realizar ensayos con cargas paralelas a la veta y perpendicular a la veta tanto en condición seca como en condición saturada [22]. Cabe aclarar que, la norma ASTM C170/C170M-16 señala las condiciones requeridas para realizar un ensayo de compresión uniaxial en condición seca y saturada con carga perpendicular y paralela a la veta, contando con al menos una muestra de un mínimo de 20 probetas. En este sentido, para los ensayos a compresión uniaxial se utilizaron 24 probetas cúbicas con dimensión de 50±0.5 mm en cada lado.

2. Desarrollo

Para la realización de los ensayos de compresión uniaxial se emplearon los equipos y materiales: pulidora marca MTI modelo UNIPOL-820, vernier digital marca POINT modelo DC-KH6, escuadra metálica de 90° marca MITUTOYO, horno de secado marca MEMMERT modelo UP500, báscula digital marca METTLER TOLEDO modelo SP30002-S, máquina de compresión marca MATEST, termómetro digital marca MATEST, agua destilada marca HERCOTEC y lijas con tamaño de grano 400.

2.1. Metodología de preparación de probetas

Las muestras de la laja tipo *salmón* se obtuvieron de diversas rocas obtenidas de la cantera ubicada en la localidad de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México. De las piedras obtenidas, se procesaron un total de 60 probetas; sin embargo, se seleccionaron un grupo de 24 probetas basado en la homogeneidad del color salmón y que la dimensión de cada probeta fuera de 50±0.5 mm en cada cara. Para la preparación de las probetas se siguió el procedimiento mostrado en el diagrama de flujo de la Fig. 3.

Tabla 1. Resistencia a la compresión de diversos tipos de rocas.

Rocas Internacionales			Rocas Nacionales		
Lugar	**Tipo de Roca**	**Resistencia a la Compresión (MPa)**	**Lugar**	**Tipo de Roca**	**Resistencia a la Compresión (MPa)**
Mahallat, Irán	Travertino tipo Atashkooh White [10]	49.3	Yucatán	Roca caliza [16]	27.72±15.8
Asturias, España	Piedra caliza tipo Rojo Cornellana [11]	129.45	Cerro de la Tambora de la comunidad de El Picacho, Tierra Blanca, Guanajuato	Toba riolítica [17]	15.49
Divčane, Jajce, Bosnia-Herzegovina	Travertino tipo Plivit Jajce [12]	46	Guangochillo, Barrial de Guadalupe, Torreón, Coahuila	Mármol [18]	59
Callejón de Huaylas, Áncash, Perú	Granito [13]	150.57	Moralillo, Tepexi de Rodríguez, Puebla	Travertino tipo Puebla [19]	64.51
Córdoba, Colombia	Caliza tipo Mármol Royal Bronce [14]	45.54	El Rosario Xochitiopan, Zacapala, Puebla	Roca caliza [20]	12
Cojitambo, Cañar, Ecuador	Roca del afloramiento [15]	23 a 32	Ixcaquixtla, Puebla	Travertino tipo Dorado Tepexi [21]	66

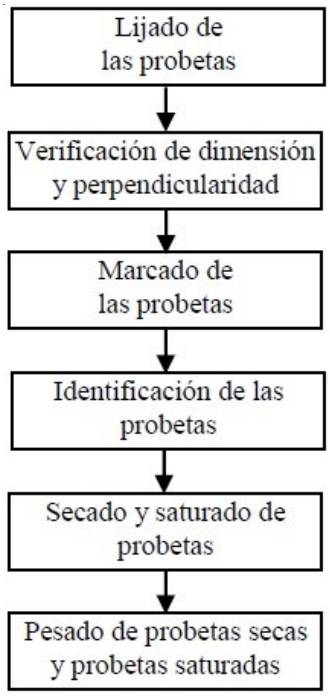


Fig. 3. Diagrama de flujo de la preparación de las probetas.

Para la preparación, las 24 probetas fueron lijadas en las caras que tuvieran contacto con los dados del equipo de compresión, con la finalidad de que el contacto entre los dados y las probetas fuera lo más uniformes posibles. Durante el proceso de lijado, se verificó con una escuadra metálica que las caras estuvieran planas y que fueran perpendiculares. En la Fig. 4a), se muestra el lijado de una probeta; mientras que en la Fig. 4b), se observa la verificación de una probeta.

Posterior de lijar con grano 400 las 24 probetas en las dos caras, se marcó aleatoriamente la orientación de carga para facilitar su colocación en la máquina de compresión; por lo que, 12 probetas fueron marcadas con una línea paralela a la veta y 12 probetas fueron marcadas con una línea perpendicular a la veta. Además, se estableció un número de identificación en cada probeta para distinguirlas durante las pruebas de compresión uniaxial. En la Fig. 5a), se observan las marcas de orientación de carga; mientras que en la Fig. 5b), se observan las probetas numeradas y marcadas.

Previo al ensayo de compresión uniaxial y con base en la norma ASTM C170/C170M-16, 12 especímenes fueron secadas en el horno durante 48 horas a una temperatura de 60±2°C; al mismo tiempo, 12 especímenes fueron sumergidas en agua destilada durante 48 horas a temperatura ambiente. En la Fig. 6a), se observan los especímenes en el horno; mientras que en la Fig. 6b), se observan los especímenes sumergidos en agua destilada.

Cabe mencionar que tanto para el secado y la saturado solo se consideró una variable que es el contenido de humedad [23]. Para garantizar que las 12 probetas dentro del horno estuvieran secas, fueron pesadas tres veces previo a su salida del horno mostrando en estas tres horas consecutivas ningún cambio significativo en su peso. También, las 12 probetas sumergidas en agua destilada fueron pesadas tres veces previo a su salida de inmersión no mostrando cambio significativo en su peso. Cabe aclarar que, las probetas secas y saturadas fueron pesadas a temperatura ambiente promedio de 22°C. En la Tabla 3, se muestran los valores del peso seco del grupo de probetas PA y PB; además, se muestran los valores de los pesos saturados del grupo de probetas PC y PD.

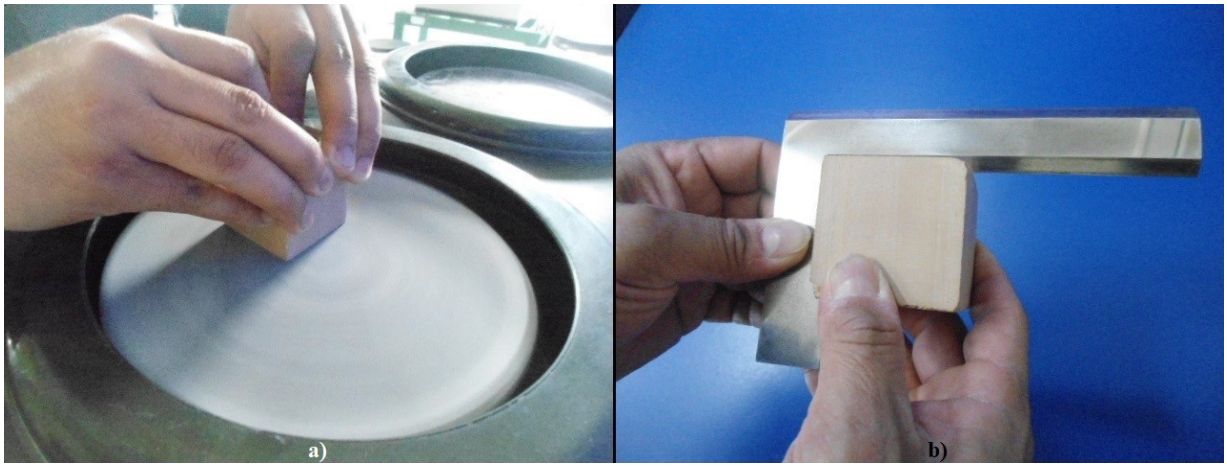


Fig. 4. a) Lijado de una probeta; b) Verificación de una probeta.

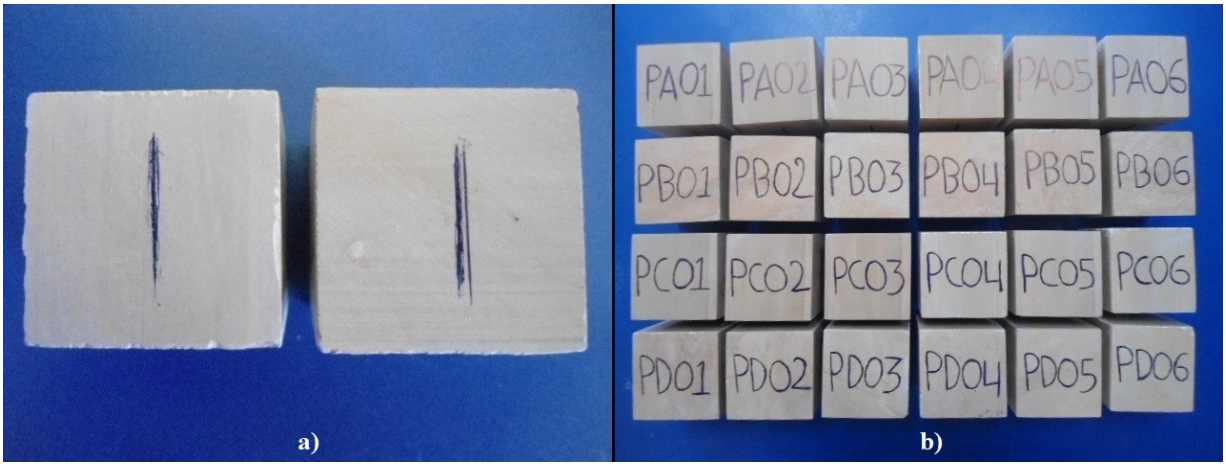


Fig. 5. a) Marca de orientación de carga en dos probetas; b) Probetas numeradas y marcadas.

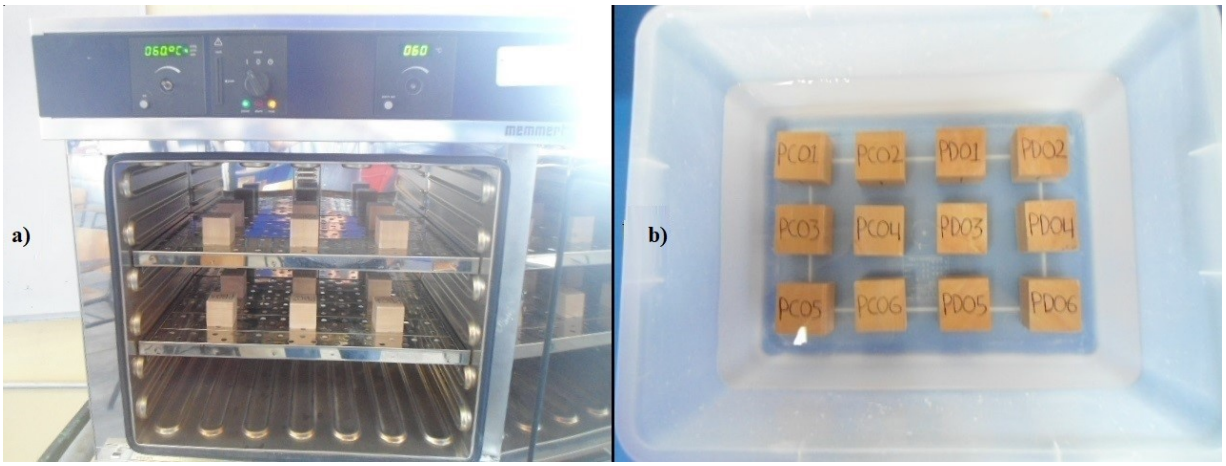


Fig. 6. a) 12 especímenes dentro del horno de secado; b) 12 especímenes sumergidos en agua destilada.

2.2. Ensayo de compresión uniaxial de probetas secas y probetas saturadas

Las probetas se colocaron en el equipo de compresión de manera que quedaran centradas en los dados y que la orientación de carga quedara al frente para poderla visualizar; además, con base en la norma ASTM C170/C170M-16, la velocidad de aplicación de carga fue de 0.5 MPa/s [22]. En la Fig. 7, se observa una probeta colocada en la máquina de compresión.

También como la misma norma señala, se realizaron ensayos de compresión uniaxial en 6 probetas secas con carga paralela a la veta, 6 probetas secas con carga perpendicular a la veta, 6 probetas saturadas con carga paralela a la veta y finalmente 6 probetas saturadas con carga perpendicular a la veta.

Tabla 3. Peso seco de las probetas PA y PB y peso saturado de las probetas PC y PD.

Número de Probeta	Peso Seco (g)	Número de Probeta	Peso Saturado (g)
PA01	302.17	PC01	315.12
PA02	305.25	PC02	316.69
PA03	295.79	PC03	311.61
PA04	301.80	PC04	312.94
PA05	302.90	PC05	313.70
PA06	300.39	PC06	311.78
PB01	303.50	PD01	316.46
PB02	300.15	PD02	311.22
PB03	296.83	PD03	308.00
PB04	301.79	PD04	310.98
PB05	306.81	PD05	310.97
PB06	301.43	PD06	307.11

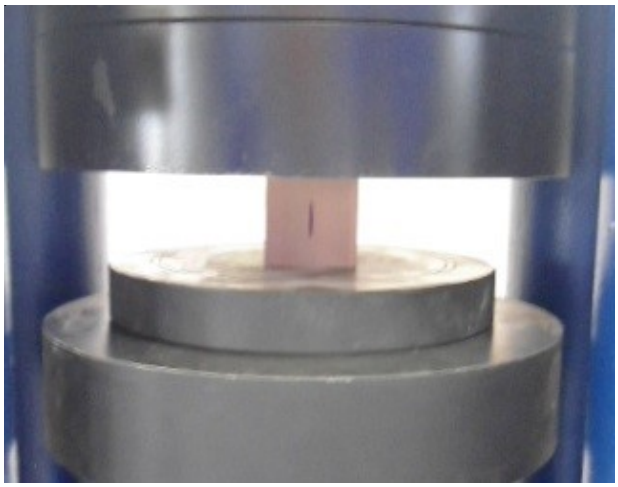


Fig. 7. Probeta colocada en la máquina de compresión

Siguiendo esta recomendación, las probetas PA01 a PA06 se probaron en condición seca con carga paralela a la veta, las probetas PB01 a PB06 se probaron en condición seca con carga perpendicular a la veta, las probetas PC01 a PC06 se probaron en condición saturada con carga paralela a la veta y que las probetas PD01 a PD06 se probaron en condición saturada con carga perpendicular a la veta. En la Fig. 8, se observan las 24 probetas de laja tipo Salmón después del ensayo de compresión uniaxial.

En las Figs. 9a) y 9c) se muestra que debido a que la carga de compresión era paralela a la veta, las rupturas de estas probetas ocurrieron orientadas a las vetas; por otro lado, en las Figs. 9b) y 9d) se observa que debido a que la carga de compresión era perpendicular a la veta, las rupturas de estas probetas ocurrieron sin orientación a las vetas.

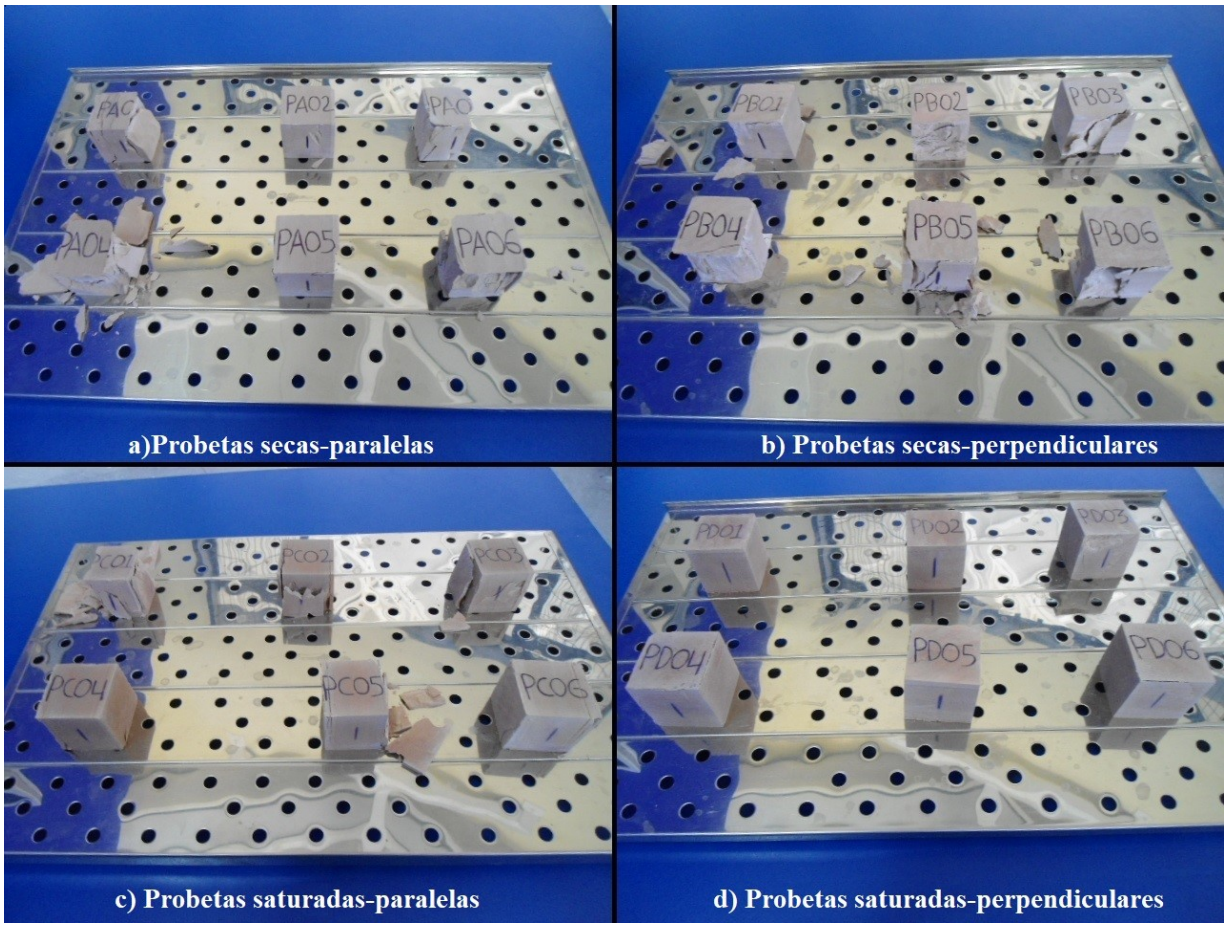


Fig. 8. Probetas después del ensayo de compresión uniaxial: a) Probetas secas-paralelas PA01-PA06; b) Probetas secas-perpendiculares PB01-PB06; c) Probetas saturadas-paralelas PC01-PC06; d) Probetas saturadas-perpendiculares PD01-PD06.

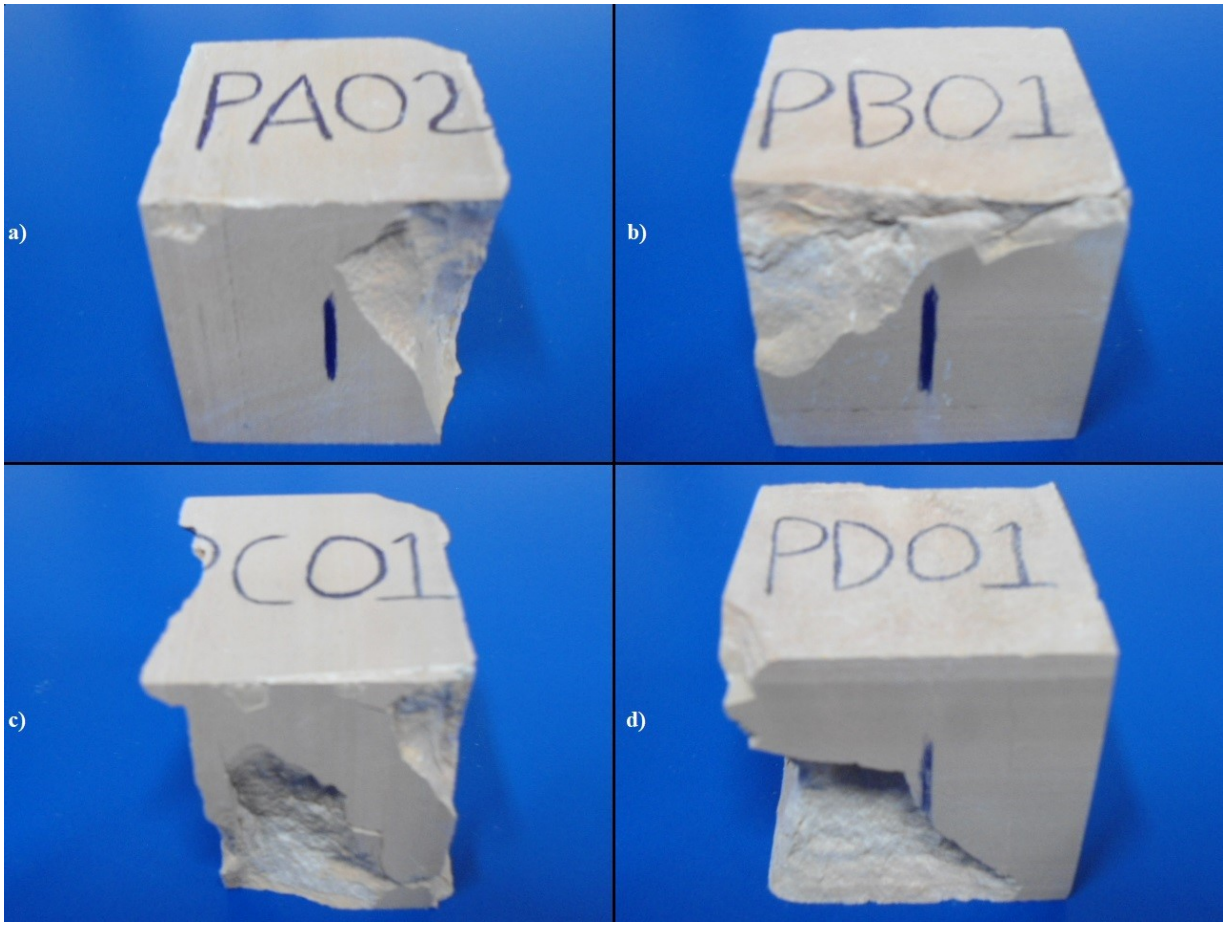


Fig. 9. a) Fotografía de la probeta PA02; b) Fotografía de la probeta PB01; c) Fotografía de la probeta PC01; d) Fotografía de la probeta PD01.

3. Resultados

Conforme a lo sugerido en la norma ASTM C170/C170M-16, se tomó la lectura de la carga de compresión axial (W) a la cual las probetas entraron en ruptura y considerando el área efectiva de contacto de carga (A_C) sobre la probeta se calculó la resistencia a la compresión (S) aplicando la ecuación 1 [22].

$$S = \frac{W}{A_C} \tag{1}$$

En la Tabla 4, se observan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión de las 24 probetas de laja tipo salmón ensayadas.

Como se señala en los valores numéricos de la Tabla 4, las probetas secas con carga paralela a la veta tuvieron una resistencia la compresión promedio de 123.15 MPa con una desviación estándar de 7.49 MPa, las probetas secas con carga perpendicular a la veta tuvieron una resistencia a la compresión promedio de 117.01 MPa con una desviación estándar de 13.47 MPa, las probetas saturadas con carga paralela a la veta tuvieron una resistencia a la compresión promedio de 62.48 MPa con una desviación estándar de 10.93 MPa, y las probetas saturadas con carga perpendicular a la veta tuvieron una resistencia a la compresión promedio de 56.35 MPa con una desviación estándar de 5.23 MPa. En la Fig. 10, se observa el diagrama de caja comparativo de la resistencia a la compresión.

Como se observa en el diagrama de la Fig. 10, el grupo de probetas saturadas con carga perpendicular a la veta tuvo la resistencia a la compresión más baja; así, para saber si este valor es significativo se realizó un análisis de varianza de dos factores. Los factores que se consideraron fueron las condiciones físicas (probetas secas y probetas saturadas) y las

Tabla 4. Resultados de la resistencia a la compresión.

Condición de la probeta	Número de Probeta	Carga de Compresión W (N)	Área de Compresión A_c (mm^2)	Resistencia a la Compresión S (MPa)
Probeta seca con carga paralela a la veta	PA01	282622	2500.00	113.05
	PA02	331151	2520.03	131.41
	PA03	295137	2499.96	118.06
	PA04	325793	2510.00	129.80
	PA05	322649	2525.00	127.78
	PA06	298212	2510.00	118.81
		Promedio		*123.15*
		Desviación Estándar		*7.49*
Probeta seca con carga perpendicular a la veta	PB01	311218	2530.08	123.01
	PB02	307146	2504.98	122.61
	PB03	225125	2504.94	89.87
	PB04	311932	2515.00	124.03
	PB05	301573	2550.25	118.25
	PB06	312576	2514.90	124.29
		Promedio		*117.01*
		Desviación Estándar		*13.47*
Probeta saturada con carga paralela a la veta	PC01	191013	2540.16	75.20
	PC02	173921	2525.00	68.88
	PC03	183862	2535.10	72.53
	PC04	126722	2510.01	50.49
	PC05	138594	2520.00	55.00
	PC06	132300	2504.94	52.82
		Promedio		*62.48*
		Desviación Estándar		*10.93*
Probeta saturada con carga perpendicular a la veta	PD01	156544	2540.16	61.63
	PD02	143671	2520.03	57.01
	PD03	131800	2485.02	53.04
	PD04	127867	2499.99	51.15
	PD05	158260	2494.80	63.44
	PD06	128868	2485.02	51.86
		Promedio		*56.35*
		Desviación Estándar		*5.23*

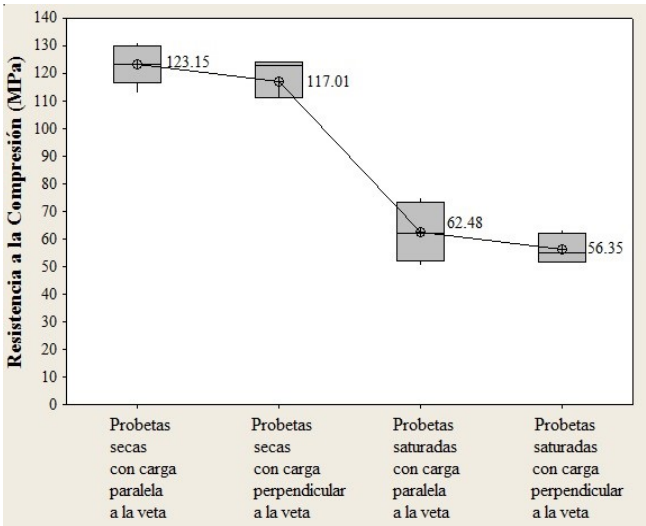


Fig. 10. Diagrama de caja comparativo de la resistencia a la compresión.

Tabla 5. Resultados del análisis de varianza de dos factores.

Origen de la variación	Suma de cuad.	Grados de libertad	Prom.	Valor de Fisher (F)	Prob.	Valor de Fisher crítico (F_{cr})
Condición de Carga	226	1	226	2.35	0.141	4.35
Condición Física	22079	1	22079	229.78	1.9×10^{-12}	4.35
Interacción	0.0001	1	0.0001	0.000001	0.999	4.35
Dentro del grupo	1922	20	96	-	-	-
Total	24227	23	-	-	-	-

condiciones de carga (carga paralela y carga perpendicular). De esta forma en la Tabla 5, se observan los resultados del análisis de varianza de dos factores.

En la Tabla 5, se observa que en relación con la condición física de las probetas (saturada o seca) se obtuvo que Fn = 229.78 es mayor que Fcr = 4.35; por lo tanto, sí existe diferencia significativa con una significancia del 5%. De esta forma, se determina que las probetas saturadas con carga paralela a la veta son las que tienen la menor resistencia a la compresión con un valor promedio de 56.35 MPa.

4. Discusión

Aunque la norma de especificaciones para lajas ASTM C629-03 *Standard Specification for Slate Dimension Stone* [24] no tiene un valor específico para la resistencia a la compresión, se pudo comparar con otras especificaciones de materiales pétreos naturales. En la Tabla 6, se muestran los valores de la resistencia a la compresión mínima de mármoles, piedras calizas, serpentinos, travertinos, granitos y piedras con base de cuarzo.

Con base en la resistencia a la compresión dadas por las normas enlistadas en la Tabla 6, la laja tipo *salmón* procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México, que tuvo una resistencia a la compresión mínima de 56.35 MPa presenta niveles de resistencia a la compresión por arriba de las que se solicitan para el mármol, la piedra caliza, el travertino y la arenisca.

Además, si se compara la resistencia a la compresión de la laja tipo *salmón* con la resistencia a la compresión de diversos tipos de rocas internacionales mostradas en la Tabla 1, se puede decir que la laja tipo Salmón tiene una resistencia a la compresión por arriba del travertino tipo Atashkooh White, travertino tipo Plivit Jajce, de la piedra caliza tipo Mármol Royal

Tabla 6. Comparación de la resistencia a la compresión de diferentes materiales pétreos naturales.

Norma	Resistencia a la Compresión (MPa)
ASTM C503/C503M-15 (Mármol) [25]	52
ASTM C568/C568M-10 (Piedra Caliza) [26]	12 (Baja densidad) 28 (Media densidad) 55 (Alta densidad)
ASTM C1526-08 (Serpentino) [27]	69
ASTM C1527/C1527M-11 (Travertino) [28]	34 (Interiores) 52 (Exteriores)
ASTM C615-03 (Granito) [29]	131
ASTM C616-03 (A base de cuarzo) [30]	27.6 (Arenisca) 68.9 (Arenisca cuarzítica) 137.9 (Cuarzita)

Bronce y de la roca del afloramiento de Cojitambo; por lo tanto, también puede ser considerada como una roca para fines de exportación. También, al compararla con la resistencia a la compresión de diversos tipos de rocas nacionales mostradas en la Tabla 2, se puede argumentar que la laja tipo *salmón* tiene una mayor resistencia a la compresión que la toba riolítica y que las rocas calizas de Yucatán y de El Rosario Xochitiopan.

5. Conclusión

Como resultado de los ensayos de compresión uniaxial realizados, se obtuvo que las probetas saturadas con carga perpendicular a la veta tuvieron una resistencia a la compresión más baja en comparación con los demás grupos de probetas; por lo tanto, se puede decir que la laja tipo *salmón* procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México, tiene una resistencia a la compresión de 56.35 MPa. Habría que decir también que, la resistencia a la compresión es una medida de la resistencia a las cargas de aplastamiento; por ejemplo, si se construyera un muro de piedra, la piedra en la parte inferior tendría que soportar la carga de compresión del peso de las piedras de arriba [8].

Es importante reconocer que, la exigencia de los mercados por el cumplimiento de las propiedades mecánicas de la laja es cada vez mayor; por lo tanto, saber si la laja cumple con la resistencia a la compresión necesaria para una aplicación en particular, la pone en ventaja con respecto otros tipos de lajas. Por lo tanto, el conocer la resistencia a la compresión de una laja puede generar beneficios para: a) productores y proveedores, ya que les permite garantizar la calidad de su producto para que no existan reclamaciones por parte de los clientes; b) ingenieros y arquitectos, pueden disponer de esta propiedad para seleccionar la laja adecuada bajo un marco normativo; c) usuarios, puedan garantizar que su inversión va a cumplir con sus necesidades específicas.

Cabe mencionar que, la laja se suele utilizar como material para pisos y revestimientos de fachadas de casas y edificios, además de emplearse para la fabricación de piezas ornamentales; sin embargo, con un amplio conocimiento tanto de sus propiedades mecánicas como físicas, se podría extender su uso para otras aplicaciones. En este sentido, con base en los resultados del ensayo de compresión uniaxial y comparando estos resultados con otros materiales naturales utilizados en columnas como el mármol, el travertino y el granito, se puede argumentar que la laja tipo *salmón* procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México, es adecuada para usos tales como columnas para mesas, patas para sillas y pedestales para lavabos de casa-habitación.

Como comentario final, se considera que los ensayos que se deberán realizar a futuro a este material son los ensayos de abrasión y de fricción para determinar si la laja tipo Salmón se pueda considerar como material para pisos en situaciones de tráfico pesado; a su vez, se pretende realizar el ensayo de flexión para decidir si puede ser utilizada como peldaños de escaleras. Por lo que se refiere a estudio acelerados de degradación, otros ensayos relevantes son las pruebas de cristalización de sales para obtener la alteración que sufre esta laja en ambientes salinos o contaminados; además, realizar ensayos de helacidad para establecer la alteración sufrida en ambientes fríos. Incluso, realizar ensayos de humedad-sequedad para determinar el deterioro sufrido en condiciones de clima lluvioso.

Agradecimientos

Los autores reconocen a la empresa Mármoles Gómez por el apoyo brindado para procesar las probetas; también, reconocen al Instituto Tecnológico Superior de Tepexi de Rodríguez por el apoyo brindado para el financiamiento y de haber facilitado las instalaciones y equipos para la ejecución de las pruebas de compresión uniaxial.

Referencias

[1] M. Navarrete, W. Martínez, E. Alonso, C. Lara, A. Bedolla, H. Chávez, D. Delgado y J. Arteaga, "Caracterización de propiedades físico-mecánicas de rocas ígneas utilizadas en obras de infraestructura", *ALCONPAT*, vol. 3, núm. 2, pp. 132-142, mayo-agosto, 2013.

[2] W. Orozco-Centeno, J. Branch, J. Jiménez-Builes, "Clasificación de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas en secciones delgadas a través programación estructurada", *Boletín de Ciencias de la Tierra*, vol. 36, pp. 5-9, diciembre, 2014.

[3] *Standard Terminology Relating to Dimension Stone*. ASTM C119-16, 2016.

[4] E. Tarbuck, F. Lutgens, *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*, 8a ed., Madrid, España: Pearson Education, 2005.

[5] L. Chia-Ming, F. Zhen-Yi, "Deformation characteristics of slate slopes associated with morphology and creep", *Engineering Geology*, vol. 178, pp. 132-154, agosto, 2014.

[6] Marble Institute of America, *Dimension Stone Design Manual Version VIII: Slate*, Ohio, USA: Marble Institute of America, 2016.

[7] T. Villanueva, *La minería de la pizarra en Castilla y León, España*, España: Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA), 2010.

[8] Marble Institute of America, *Dimension Stone Design Manual Version VIII: Stone testing*, Ohio, USA: Marble Institute of America, 2016.

[9] R. Esbert, F. Alonso, J. Ordaz, "La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación", *Trabajos de Geología*, vol. 28, pp. 87-95, 2008.

[10] A. Jamshidi, M. Nikudel, M. Khamehchiyan, A. Zalooli, H. Yeganehfar. "Estimating the Mechanical Properties of Travertine Building Stones Due to Salt Crystallization Using Multivariate Regression Analysis", *Journal of Sciences*, vol. 28, núm. 3, pp. 231-241, 2017.

[11] L. Suárez, L. Calleja, I. Díez, V. Ruíz, A. Rodríguez, F. Alonso, "Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias", *Trabajos de Geología*, vol. 73, pp. 73-84, 2002.

[12] N. Ademovi, A. Kurtovi, "Stone and mortar in bridges from the Ottoman period in Bosnia and Herzegovina", *GRAEVINAR*, vol. 70, núm. 3, pp. 213-224, 2018.

[13] L. Torres, J. Poterico, "Propiedades físico-mecánicas de las rocas o minerales y su aplicación en el diseño de obras de ingeniería en el Callejón de Huaylas - 2013", *Aporte Santiaguino*, vol. 10, núm. 1, pp. 99-106, 2017.

[14] D. Rocha-Vargas, J. Becerra-Becerra, D. Benavente, J. Cañaveras, A. Costa, "Estudio preliminar de las características petrográficas, petrofísicas y comportamiento mecánico de rocas naturales tipo "Piedra Bogotana" y "Mármol Royal Bronce" utilizadas en construcciones patrimoniales y recientes en Colombia", *UIS Ingenierías*, vol. 18, núm. 3, pp. 203-222, 2019.

[15] R. Celi, D. Michelle, "Correlación entre la deformación y la resistencia a la compresión uniaxial en rocas", Trabajo de Grado, Escuela de Ingeniería en Minas, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2019.

[16] L. Alonso, L. Espinoza, "Estudio de las propiedades de la roca caliza de Yucatán", *Ingeniería*, vol. 7, núm. 1, pp. 27-36, 2003.

[17] J. Sánchez, *Inventario físico de los recursos minerales del municipio Tierra Blanca, Gto.*, Hidalgo, México: Consejo de Recursos Minerales, 2003

[18] H. Arriaga, *Inventario físico de los recursos minerales de la carta La Flor de Jimulco G13-D46*, México: Servicio Geológico Mexicano, 2012.

[19] A. Morales, T. Flores, M. Velasco, "Estudio de la resistencia a la compresión del travertino tipo Puebla procedente de Moralillo, Tepexi de Rodríguez, Puebla, México", *Ingeniantes*, año 5, vol. 1, núm. 2, pp. 18-25, noviembre, 2018.

[20] A. Morales-Tassinari, M. Velasco-Ordóñez y P. Cruz-Ortega, "Resistencia a la compresión de la roca caliza procedente de la cantera de la localidad de El Rosario Xochitiopan, Zacapala, Puebla, México", en *XVII Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (CNIES 2018)*, Ciudad de México, México, 12-16 octubre, 2018.

[21] A. Morales-Tassinari, M. Azcaray-Rivera, M. Velasco, A. Servín-Martínez, J. Hernández-Zárate, "Caracterización físico-mecánica de dos travertinos de la región de Tepexi de Rodríguez, Puebla, México", en *XXV Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, Mazatlán, Sinaloa, México, 18-20 septiembre, 2019.

[22] *Standard Test Method for Compressive Strength*. ASTM C170/C170M-16. 2016.

[23] J. Hernández, P. Quinto, "Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso", *Científica*, vol. 9, núm. 2, pp. 63-71, 2005.

[24] *Standard Specification for Slate Dimension Stone*. ASTM C529-03. 2004.

[25] *Standard Specification for Marble Dimension Stone*. ASTM C503/C503M-15. 2015.

[26] *Standard Specification for Limestone Dimension Stone*. ASTM C568/C568M-10. 2010.

[27] *Standard Specification for Serpentine Dimension Stone*. ASTM C1526-08. 2014.

[28] *Standard Specification for Travertine Dimension Stone*. ASTM C1527/C1527M-11. 2011.

[29] *Standard Specification for Granite Dimension Stone*. ASTM C615-03. 2003.

[30] *Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone*. ASTM C616-03. 2003.

DOI: https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v24n2a10

Científica, vol. 24, núm. 2, pp. 171-178, julio-diciembre 2020.
ISSN 2594-2921, Instituto Politécnico Nacional México

Solución numérica del flujo transitorio en tanques cilíndricos horizontales producido por la inyección de aire con tres toberas*

Arturo **Lizardi-Ramos**
Hilario **Terres-Peña**
Raymundo **López-Callejas**
Mabel **Vaca-Mier**
Sandra **Chávez-Sánchez**

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco
Departamento de Energía
Av. San Pablo No. 180, Col. Reynosa Tamaulipas, CP 02200,
Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México.
MÉXICO

correo electrónico (email):
arlr@azc.uam.mx
tph@azc.uam.mx
rlc@azc.uam.mx
mvm_lcar@hotmail.com
scs@azc.uam.mx

Recibido 11-02-2020, aceptado 30-04-2020.

Resumen

Se presenta el análisis numérico transitorio del flujo generado por la inyección de aire en un cilindro horizontal que contiene agua y que su parte superior está abierta a la atmósfera. El aire es introducido al depósito por medio de tres toberas y frente a ellas se colocan dos tipos de deflector; con sección transversal circular y triangular. El modelo matemático contempla las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes en coordenadas cilíndricas para un fluido newtoniano, viscoso, en dos fases, en régimen turbulento y en estado transitorio; y se resuelve con el método numérico del elemento finito. Los resultados muestran los campos de velocidad transitorios en la sección transversal del recipiente que coincide con el centro de las toberas que inyectan el aire al contenedor. También se analiza el comportamiento de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del cilindro para diferentes tiempos y para la posición axial antes mencionada. Al comparar el campo de velocidades en estado permanente del sistema con deflectores triangulares contra el circular se encontró que: a) el valor del vector velocidad en la parte superior izquierda del tanque disminuyó 3.20%; b) el valor máximo positivo promedio de la velocidad azimutal a lo largo del diámetro del depósito disminuyó 3.71%.

Palabras clave: deflectores, flujo radial, velocidad azimutal.

Abstract
(Numerical Solution of the Transient Flow in Horizontal Cylindrical Tanks Produced by the Injection of Air with Three Nozzles)

The numerical transient analysis of the flow generated by the injection of air in a horizontal cylinder that contains water and is open to the atmosphere, is presented. The air is introduced with three nozzles and, in front of them, two types of baffles with circular and triangular cross-section are placed. The mathematical model considers the Reynolds-Navier-Stokes equations in cylindrical coordinates for a two-phase viscous Newtonian fluid, in the turbulent regime, and the transitory state; and it is solved using the numerical finite element method. The results show the transient velocity fields in the cross-section of the container which coincides with the center of the nozzles that inject the air into the container. The behavior of azimuthal velocity along the diameter of the cylinder for different times and the aforementioned axial position is also analyzed. By comparing the fields of velocity in a steady state of the system with triangular baffles against circular ones it was found that: (a) the value of the velocity vector in the left upper part of the tank diminished 3.20%; and (b) the maximum average positive value of the azimuth velocity along the diameter of the container diminished 3.71%.

Index terms: deflectors, radial flow, azimuth velocity.

Nomenclatura

C, calor específico (J/kg K)
C_d, coeficiente de arrastre
d_b, diámetro de la burbuja (m)
$\mathbf{F}$, vector fuerza de cuerpo (N/ m^3)

*Este artículo es la versión extendida de uno de los mejores trabajos del Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas 2019

g, aceleración gravitatoria (m/s^2)
k, conductividad térmica (W/m K)
m_{gl}, tasa de transferencia de masa (kg/s m^3)
M_w, peso molecular de la burbuja de gas (kg/kmol)
$-\mathbf{n}$, vector unitario normal
$\mathbf{N}_g$, vector flujo de masa de gas (kg/m^2 s)
P, presión (Pa)
Ru, constante universal de los gases (J/mol K)
r, coordenada radial (m)
Re, número de Reynolds
t, tiempo (s)
T, temperatura (K)
u, componente de velocidad radial (m/s)
v, componente de velocidad tangencial (m/s)
$\mathbf{V}_g$, velocidad del gas (m/s)
$\mathbf{V}_l$, velocidad de la fase líquida (m/s)
$\mathbf{V}_{des}$, velocidad de deslizamiento (m/s)
$\mathbf{V}_{in}$, velocidad del gas a la entrada (m/s)
w, componente de velocidad axial (m/s)
z, coordenada axial (m)
β, coeficiente de expansión volumétrico (K-1)
ρ_l, densidad del líquido (kg/m^3)
ρ_g, densidad del gas (kg/m^3)
ρ_{in}, densidad del gas a la entrada (kg/m^3)
μ_l, viscosidad dinámica de la fase líquida (kg/m s)
μ_T, viscosidad turbulenta (kg/ms)
θ, coordenada tangencial (grados)
Θ_l, fracción de volumen líquido (m^3/m^3)
Θ_g, fracción de volumen de gas (m^3/m^3)

1. Introducción

El movimiento de líquidos en el interior de recipientes cilíndricos horizontales, generado por la inyección de aire a través de sus fronteras, es un fenómeno que interesa por el gran número de aplicaciones industriales. Por ejemplo, en acuicultura se persigue la eliminación de substancias inertes, la destrucción de gérmenes patógenos y además facilitar el intercambio de oxígeno del aire a la fase líquida del agua. Por lo anterior, para la acuicultura es prudente mantener el agua de los tanques tan próxima como sea posible a la saturación total de oxígeno disuelto (100%) y para ello se requiere un proceso de aireación. Existen varios métodos para este fin, uno de ellos consiste en inyectar el aire que viene de un compresor a través de una tubería que tiene en un extremo una tobera, al interior del depósito [1]. En el sector agrícola, por ejemplo, se utilizan contenedores cilíndricos que almacenan fertilizantes y que se instalan en los cabezales de riego donde se realizan las diferentes disoluciones de abonos químicos para su aplicación junto con el riego. El número de tanques que hay en una instalación depende del uso que requiere la explotación agrícola, siendo lo más usual la instalación de cuatro depósitos para fertilizantes y uno para aportaciones especiales como ácidos o componentes orgánicos. A su vez, los contenedores llevan sistemas de agitación para mantener disueltos los fertilizantes. Estos pueden ser de dos tipos: a) agitadores mecánicos: compuestos por un motor cuyo eje provoca la rotación de una hélice que agita la disolución del tanque, b) agitadores neumáticos: compuestos por una bomba soplante conectada a un sistema de tuberías instalada en los depósitos que inyecta aire en la disolución, provocando la agitación de la misma, *World Fertilizer use Manual* [2]. Otro proceso de inyección de aire en contenedores cilíndricos, que ha sido estudiado ampliamente, se encuentra en los convertidores de cobre donde se requiere de la inyección de aire para oxidar las impurezas del mismo. Por ejemplo, A. Valencia *et al.* [3] estudiaron numéricamente la dinámica de fluidos dentro de un recipiente con agua (con la geometría de un convertidor de cobre) debido a la inyección de aire provocada por una tobera sumergida. La simulación tridimensional, dependiente del tiempo, se llevó a cabo con el software Fluent de CFD. Se compararon los resultados numéricos y experimentales de la velocidad de entrada del aire en el depósito que produce los resultados más favorables respecto a una buena mezcla en el recipiente con un mínimo de salpicaduras. C. Real *et al.* [4] caracterizaron un convertidor de cobre con inyección de aire en el fondo, utilizando el software Fluent. En el planteamiento del problema contemplaron las ecuaciones de Navier-Stokes en flujo transitorio, para múltiples velocidades de inyección de aire, y en condiciones isotérmicas. En dicho trabajo se encontró que a medida que se aumentaba la velocidad del aire inyectado, se incrementaba la energía cinética de la mata de cobre de manera casi lineal. D. K. Chibwe *et al.* [5], analizaron experimental y numéricamente el patrón de flujo y mezclado en un convertidor industrial Peirce-Smith, empleando un modelo en frío. Se llevaron a cabo simulaciones 2-D y 3-D del sistema de tres fases. La capa de mata y escoria fueron simuladas con agua y queroseno respectivamente. Los resultados revelaron que tanto la tasa de flujo volumétrico del aire como la presencia de la capa de escoria superpuesta tienen efectos profundos sobre la eficiencia de mezcla del convertidor. Otra aplicación, pero para el caso de flujo con gases es la de T. Fernández, M. Toledo, J. F. Vázquez [6], ellos analizaron el movimiento de un torbellino generado por un ventilador axial de velocidad variable dentro de un tubo que tiene una relación longitud/diámetro (x/d) de 7. Se determinó que la intensidad del torbellino disminuye con el incremento del número de Reynolds y que la correlación más adecuada entre las variables es del tipo lineal. Asimismo, se encontró que existe una analogía entre el incremento de la distancia axial con el incremento del número de Reynolds.

En este trabajo se pretenden obtener los campos de velocidad transitorios generados por la inyección de aire en un cilindro horizontal que contiene agua y cuya superficie supe-

rior está abierta a la atmósfera. El aire es inyectado por tres toberas y frente a ellas se colocan dos tipos de deflector: con sección transversal circular y triangular. Para ello se resuelven las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes en coordenadas polares cilíndricas, en estado transitorio, junto con las condiciones iniciales y de frontera adecuadas. Los resultados permitirán obtener los campos de velocidad transitorios en la sección transversal del recipiente que coincide con el centro de las toberas que inyectan el aire al contenedor, así como el comportamiento de la velocidad azimutal (v) a lo largo del diámetro del cilindro para diferentes tiempos.

2. Problema por analizar

El sistema a analizar consta de un depósito cilíndrico horizontal de radio R1 = 100 mm y longitud L1 = 100 mm, cuyo interior tiene agua. El recipiente cuenta con una abertura en la parte superior de L2 = 28.2 mm de ancho que permite la interacción con la atmósfera. El aire se introduce radialmente al tanque a través de tres toberas de radio R2=2 mm colocadas en la parte media de la longitud del cilindro y a un ángulo de θ1 = 225°, θ2 = 270º y θ3 = 315°, respectivamente, Fig. 1 y 2. Para mejorar la distribución de aire en el tanque se colocan deflectores enfrente de cada tobera. Los dos tipos de deflector empleados son de sección transversal: circular de radio R3 = 5 mm y triangular de lado L3 = 8.66 mm, Fig. 3. Los deflectores se colocan enfrente a las toberas a una distancia de R4 = 97 mm desde el centro del depósito.

3. Planteamiento matemático

La formulación matemática se basa en las ecuaciones de Reynolds-Navier-Stokes (RANS) que se pueden emplear para determinar el flujo de un fluido Newtoniano, viscoso, bifásico,

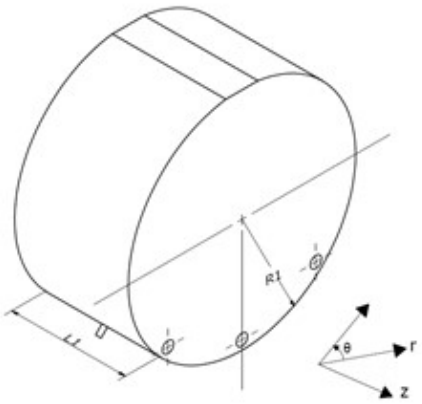


Fig. 1. Vista 3D del sistema en estudio.

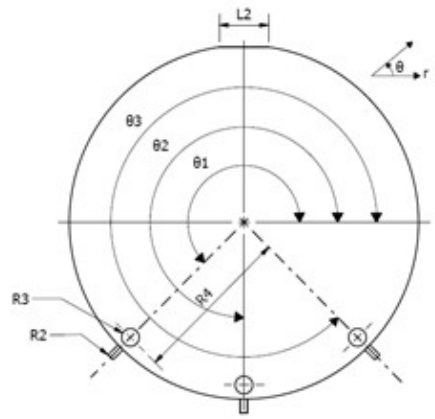


Fig. 2. Vista frontal del sistema en estudio.

en régimen turbulento y en estado transitorio, en el interior de un recipiente cilíndrico, [7], [8], [9]. Para la fase líquida:

$$\varphi_l \rho_l \frac{\partial \vec{V}_l}{\partial t} + \varphi_l \rho_l \vec{V}_l \cdot \nabla \vec{V}_l = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\varphi_l (\mu_l + \mu_T) \left(\nabla \vec{V}_l + (\nabla \vec{V}_l)^T \right) \right] + \varphi_l \rho_l g + \vec{F} \tag{1}$$

Sabiendo que para bajas concentraciones de gas, la fracción de volumen líquido ϕ_l es aproximadamente uno, entonces:

$$\nabla \cdot \vec{V}_l = 0 \tag{2}$$

La ecuación para la fase gaseosa es:

$$\frac{\partial \rho_g \varphi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \varphi_g \vec{V}_g) = -m_{gl} \tag{3}$$

Pero se considera que no hay transferencia de masa entre la fase líquida y gaseosa, por lo que $m_{gl} = 0$. Así, la ecuación (3) queda:

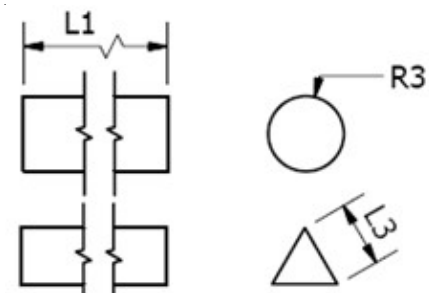


Fig. 3. Tipos de deflector empleados.

$$\frac{\partial \rho_g \varphi_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \varphi_g \vec{V}_g) = 0 \tag{4}$$

La densidad del gas se calcula a partir de la ecuación de estado del gas ideal:

$$\rho_g = \frac{P M_w}{Ru\, T} \tag{5}$$

Aquí M_w es el peso molecular de la burbuja de gas, $Ru = 8.314$ J/mol, K es la constante universal de los gases y $T = 293$ K la temperatura del gas. La velocidad del gas se puede calcular a partir de la ecuación $\mathbf{V}_g = \mathbf{V}_l + \mathbf{V}_{des}$, donde $\mathbf{V}_{des}$ es la velocidad de deslizamiento entre el agua y el aire. El balance presión-arrastre se emplea para calcular $\mathbf{V}_{des}$. El modelo se basa en la suposición de que las fuerzas de presión de las burbujas se equilibran con la fuerza de arrastre:

$$\frac{3\, C_d}{4\, d_b} \rho_l \, |\vec{V}_{des}| \, \vec{V}_{des} = -\nabla P \tag{6}$$

Donde $d_b = 0.001$ m es el diámetro de la burbuja y C_d es el coeficiente de arrastre (adimensional). Debido a que el diámetro de burbuja es inferior a 0.002 m, se usó el modelo de coeficiente de arrastre de Hadamard-Rybczynski [7], [10].

$$C_d = \frac{16}{Re} \tag{7}$$

El número de Reynolds se calcula con:

$$Re = \frac{d_b\, \rho_l \, /\vec{V}_{des}/}{\mu_l} \tag{8}$$

Para las condiciones de frontera se tomó la condición de no deslizamiento, $\mathbf{V}_l = 0$, en las paredes internas del depósito y sobre los deflectores. Para la entrada del aire se considera que $-\mathbf{n}\mathbf{N}_g = \mathbf{V}_{in}\rho_{in}$ donde $-\mathbf{n}$ es un vector normal a la sección de entrada que "apunta" al interior del cilindro. El valor de la velocidad del aire a la entrada se tomó como $\mathbf{V}_{in} = 0.1$ m/s y la densidad como $\rho_{in} = 0.973$ kg/m^3. Para la salida del aire se consideró la condición de no deslizamiento, $\mathbf{n}\mathbf{V}_l = 0$, la cual supone la condición de no penetración del agua pero si del aire. Finalmente, las ecuaciones (1) y (4) se resuelven para obtener las variables $\mathbf{V}_l$ y P. Del campo de velocidades $\mathbf{V}_l$ se obtienen las tres componentes escalares: radial, u, tangencial, v, y axial, w.

4. Planteamiento numérico

Para resolver las ecuaciones que definen el movimiento del fluido en el interior del recipiente se empleó el método numérico del elemento finito. Para ello se utilizó el software COMSOL Multiphysics, el cual es un programa de simulación multi-plataforma que permite hacer estudios complejos basados en la física del problema y que son acoplados a sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. La metodología usada fue [11], [12]:

a) Se selecciona en el software el modelo 3D.
b) Se dibuja la geometría a analizar. Para ello se generó un cilindro horizontal de 100 mm de radio por 100 mm de longitud, con una abertura en la parte superior de 28.2 mm de ancho a todo lo largo del depósito. Para introducir el aire al tanque, que se encuentra lleno de agua, se colocaron tres toberas de 2 mm de radio, ubicadas a la mitad de la longitud del cilindro y a un ángulo de 225°, 270° y 315°, respecto a la horizontal. Se generaron dos sistemas con deflectores de diferente sección transversal: uno circular de 5 mm de radio y uno triangular de 8.66 mm de lado. Los deflectores se colocaron enfrente a las toberas a una distancia de 97 mm medido desde el centro del recipiente.
c) Se analiza la independencia del tamaño de la malla y su relación con los resultados. Para ambos sistemas se generaron diferentes tipos de malla con distintos números de elementos. En el arreglo con deflectores de sección transversal circular y triangular, las mallas que dieron los mejores resultados fueron las de 135,840 y 213,000 elementos, para el primer caso, y de 92,191 y 210,000 elementos, para el segundo caso. La diferencia entre los resultados de ambos mallados fue de tan solo 0.19 % y de 0.25%, respectivamente. Así que, considerando los recursos de cómputo disponibles y el tiempo de convergencia de la solución, se eligieron las mallas con 135,840 y 92,191 elementos, Fig. 4 y 5.
d) Se introduce el valor de las propiedades del agua y aire: viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ), calor específico (C), coeficiente de expansión volumétrico (β) y conductividad térmica (k). La presión en el sistema se modela con el algoritmo de relajación (TDMA).
e) Se introducen las condiciones de frontera y se da el valor de la velocidad de entrada del aire, en este caso $\mathbf{V}_{in} = 0.1$ m/s. La interfaz es resuelta con el código de flujo burbujeante, turbulento y bifásico, que es el adecuado para resolver las ecuaciones descritas en este trabajo.
f) Se configura la solución de paso segregada con un error de 1.0×10^{-8} como criterio de convergencia.
g) Se corre el programa y se obtienen los valores transitorios de los campos del vector velocidad ($\mathbf{V}_l$) y de la componente de velocidad azimutal (v).

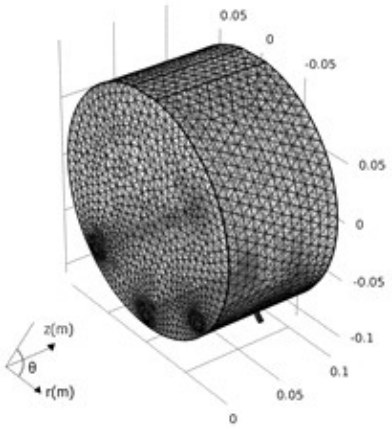


Fig. 4. Malla del tanque con deflectores de sección transversal circular.

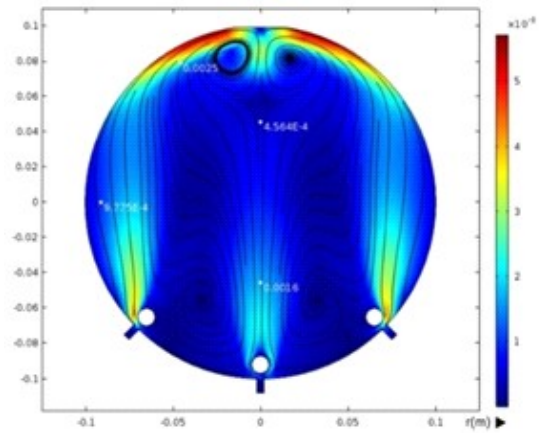


Fig. 6. Campo de velocidades con deflectores circulares, t = 1 s.

5. Análisis y discusión de resultados

Una vez hecha la programación, se llevaron a cabo las corridas para los dos arreglos planteados. El programa se dejó correr con un paso temporal de 0.5 segundos desde 0 s hasta un tiempo de 10 min, observándose que a los 60 s se había alcanzado el estado permanente. Lo anterior se concluyó al comparar la diferencia entre los resultados de los tiempos 40 s y 50 s, y entre 50 s y 60 s, siendo esta de 0.71 y 0.67%, respectivamente. De la Fig. 6 a la 11 se muestran los campos del vector velocidad para la los dos casos a analizar y para los tiempos de 1 s, 10 s y 60 s. En dichas figuras se resalta el valor del vector velocidad en cuatro posiciones de interés, ubicados de acuerdo con el sistema de referencia de la Fig. 2, (R mm, θ°), en: (45.5, 90°), (91, 120°), (91, 180°) y (45.5, 270°), lo anterior con el propósito de comparar su magnitud al cambiar el tiempo y el tipo de deflector. Es importante señalar que se está analizando el movimiento del fluido dentro del contenedor sin tomar en cuenta la concentración aire-agua que se tiene en el sistema, es decir, que el flujo de aire solo se toma en cuenta como el causante del movimiento.

En la Fig. 6 se muestra el arreglo con deflectores circulares y tiempo 1 s. Se observa que el aire se introduce al recipiente, se incorpora al agua y rodea a los deflectores. El flujo se mueve principalmente hacia la parte externa de los deflectores laterales y hacia el centro en el deflector inferior. En la parte superior del cilindro se tienen los valores más altos de la velocidad (2.5×10^{-3} m/s) y en la zona lateral se presentan bajas magnitudes (0.98×10^{-3} m/s). En la Fig. 7, que muestra el tiempo de 10 s, se aprecia que el flujo inducido a través de las toberas ha comenzado a formar dos vórtices secundarios en

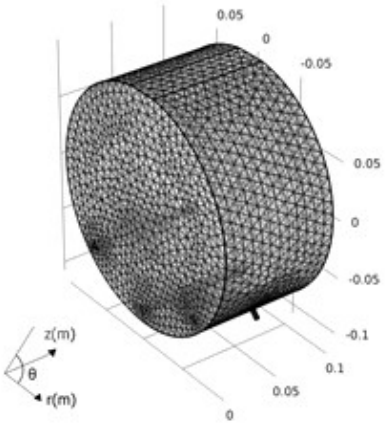


Fig. 5. Malla del tanque con deflectores de sección transversal triangular.

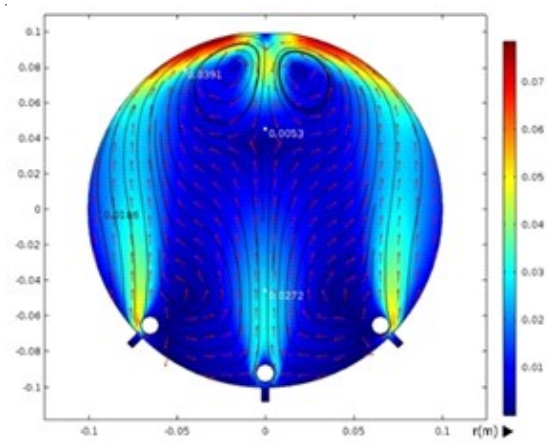


Fig. 7. Campo de velocidades con deflectores circulares, t =10 s.

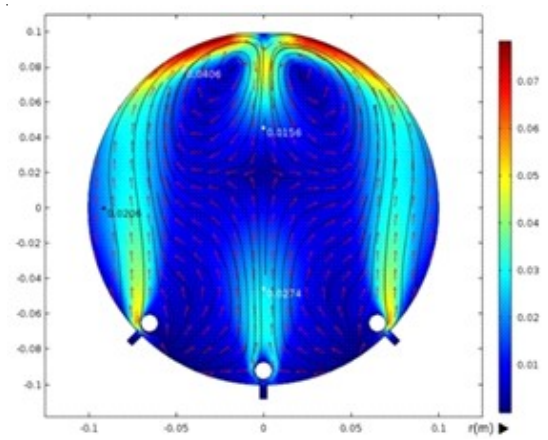


Fig. 8. Campo de velocidades con deflectores circulares, t = 60 s.

la parte superior del recipiente. El de lado izquierdo gira en sentido horario y el lado derecho gira en sentido anti horario. Nuevamente, como en el caso anterior, se tienen los valores más altos de la velocidad en la parte superior del depósito (39.1×10^{-3}) y disminuyen sus magnitudes en la parte lateral (18.6×10^{-3} m/s). Finalmente, en la Fig. 8 se muestra el tiempo de 60 s, es decir, cuando se ha alcanzado el estado permanente. Se aprecia que los dos flujos rotatorios ya están bien definidos. La velocidad en la parte superior del recipiente toma el valor de 40.6×10^{-3} y en la parte lateral de 20.6×10^{-3} m/s.

Por otro lado, en las Fig. 9, 10 y 11, se muestra el arreglo con deflectores triangulares para un tiempo de 1, 10 y 60 s. Se aprecia que el comportamiento es parecido al caso anterior, pero con magnitudes distintas. En la Tabla 1 se muestran, a manera de resumen, los valores de la velocidad para las ubicaciones (91 mm, 120°) y (91 mm, 180°), para los dos arreglos y para los tres tiempos.

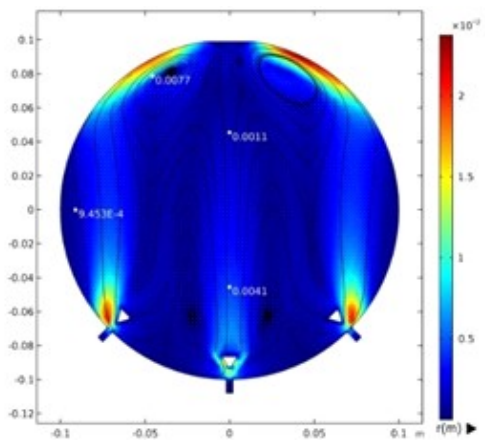


Fig. 9. Campo de velocidades con deflectores triangulares, t = 1 s.

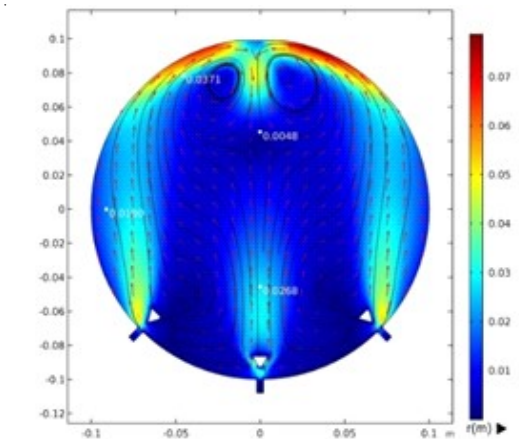


Fig. 10. Campo de velocidades con deflectores triangulares, t = 10 s.

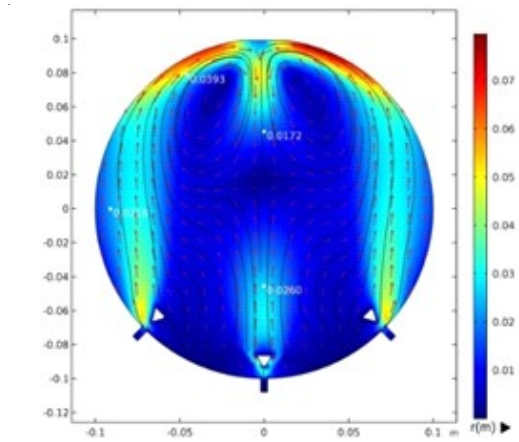


Fig. 11. Campo de velocidades con deflectores triangulares, t = 60 s.

Comparando la magnitud del vector velocidad en la parte superior del tanque, para el tiempo de 60 s, del sistema con deflectores triangulares respecto a los circulares, se observó una disminución del 3.20%. Es decir que en esta parte del depósito se tiene una mayor velocidad cuando se colocan los deflectores circulares a comparación de los triangulares.

Tabla 1. Vector velocidad ($\mathbf{V}_1$, m/s) en los dos arreglos y para las posiciones seleccionadas.

Tiempo (s)	Deflector circular	Deflector triangular
1	2.5×10^{-3}, 0.98×10^{-3}	7.7×10^{-3}, 0.94×10^{-3}
10	39.1×10^{-3}, 18.6×10^{-3}	37.1×10^{-3}, 19.0×10^{-3}
60	40.6×10^{-3}, 20.6×10^{-3}	39.3×10^{-3}, 21.8×10^{-3}

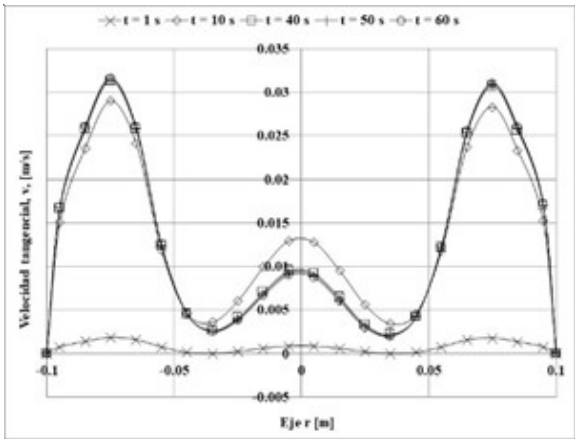


Fig. 12. Velocidad tangencial (*v*) para arreglo con deflectores circulares.

Para analizar más detalladamente el movimiento del fluido en los dos arreglos, se elaboraron gráficas de la componente de velocidad tangencial (*v*) a lo largo de la línea horizontal que va de los 0° hasta 180°, y para los tiempos de 1, 10, 40, 50 y 60 segundos. En la Fig. 12 se presenta la distribución de velocidades del sistema con deflectores circulares para los cinco tiempos. Para el tiempo de 1 s, se aprecia que la curva de la componente de velocidad tangencial comienza en cero sobre la pared izquierda del cilindro, posteriormente va aumentando su valor hasta un máximo positivo de 1.81×10^{-3} m/s, de allí baja su intensidad, pero se vuelve a presentar un incremento de su magnitud hasta otro máximo positivo de 0.84×10^{-3}. Después de este punto la velocidad nuevamente vuelve a decrecer y a aumentar su valor hasta un máximo positivo de 1.75×10^{-3} m/s. Finalmente disminuye su magnitud hasta hacerse cero sobre la pared derecha del tanque. Este comportamiento es correcto debido a la

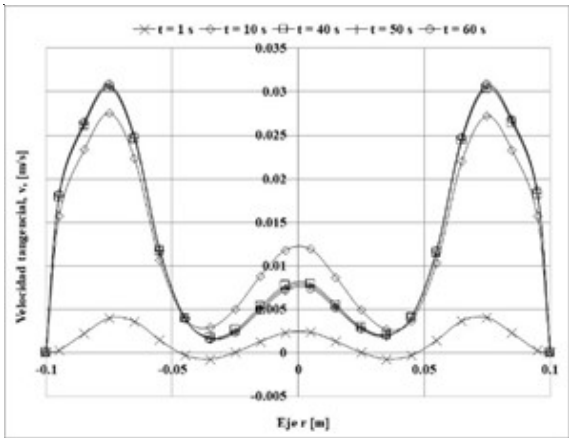


Fig. 13. Velocidad tangencial (v) para arreglo con deflectores triangulares.

Tabla 2. Valores máximos positivos de la velocidad tangencial (v, m/s) para los dos arreglos.

Tiempo (s)	Circular	Triangular
1	1.81×10^{-3}, 0.84×10^{-3}, 1.75×10^{-3}	3.97×10^{-3}, 2.33×10^{-3}, 4.04×10^{-3}
10	28.97×10^{-3}, 12.92×10^{-3}, 28.30×10^{-3}	27.54×10^{-3}, 11.89×10^{-3}, 27.21×10^{-3}
60	31.62×10^{-3}, 9.00×10^{-3}, 31.03×10^{-3}	30.82×10^{-3}, 7.37×10^{-3}, 30.79×10^{-3}

simetría que presenta el modelo físico. En el tiempo de 10 s, tal como se mostró anteriormente en el campo de velocidades, es cuando se empiezan a formar dos flujos circulatorios en la parte superior del arreglo. Estos flujos provocan en la velocidad tangencial la formación de tres máximos positivos con valores de: 28.97×10^{-3}, 12.92×10^{-3} y 28.30×10^{-3} m/s. Las tres toberas inducen el movimiento del fluido hacia la parte superior del depósito, ocasionando la formación de estas magnitudes máximas. Finalmente, para el tiempo de 60 s, los flujos circulatorios han alcanzado el estado permanente. Para este tiempo la velocidad tangencial también tiene tres valores máximos positivos, estos son de: 31.62×10^{-3}, 9.00×10^{-3} y 31.03×10^{-3} m/s. Cabe mencionar que solo se han colocado las curvas de 40, 50 s para mostrar que el tiempo de 60 s corresponde al estado permanente; esto se comprueba al observar que en estos tiempos las curvas prácticamente se empalman.

En la Fig. 13 se presenta la distribución de velocidades para el sistema con deflectores triangulares y para los tiempos de 1, 10, 40, 50 y 60 segundos. En ella se observa un comportamiento parecido al caso anterior, pero con magnitudes distintas. En la Tabla 2 se indican los valores máximos de la velocidad tangencial para los dos arreglos estudiados y para tres tiempos.

Comparando las magnitudes máximas positivas promedio de la componente de velocidad tangencial del arreglo con deflectores triangulares respecto a los circulares, se encontró una disminución del 3.71%. Es decir, el flujo con mayor intensidad se tiene con los deflectores circulares. Estos resultados tienen concordancia con el análisis de los campos de velocidad antes descritos.

6. Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el campo de velocidades y el comportamiento de la componente de velocidad tangencial, dependientes del tiempo, que se producen por la inyección de aire, a través de tres toberas, en un depósito cilíndrico

horizontal que contiene agua, que está abierto a la atmósfera, y al cual se le colocaron deflectores de sección transversal: circular y triangular, enfrente de las toberas. Tanto el método numérico como la metodología propuesta para la solución fueron adecuados, pues permitieron obtener los campos de velocidad transitorios de los arreglos planteados, así como el comportamiento de la velocidad tangencial a lo largo del diámetro del recipiente, encontrándose concordancia con resultados de la literatura. Al comparar el valor del vector velocidad en la parte superior del tanque, para el tiempo de 60 s, del sistema con deflectores triangulares respecto a los circulares, se observó una disminución del 3.20%. Por otro lado, al hacer la misma comparación pero de las magnitudes máximas positivas de la velocidad tangencial promedio, se encontró una reducción del 3.71%. Ambos resultados mostraron que los deflectores circulares son los que tienen mejor desempeño en la distribución del movimiento del fluido en el interior del tanque, aunque la diferencia que hubo entre ambos fue pequeña. Aunque se obtuvieron buenos resultados, aún falta mayor investigación para considerar otras variables de interés, tales como otros rangos de velocidad, distintos tipos de fluido, etc.

Referencias

[1] O. Galli-Merino, F. Miguel-Sal, *Sistemas de recirculación y tratamiento de agua*, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos CENADAC, Santa Ana-Corrientes, Argentina, 2007. [en linea]. Disponible en: http://www.minagri.gob.ar/sitio/areas/acuicultura/cultivos/otros/. Consultado: 10 enero 2019.

[2] D. Halliday, M. Trenkel, *IFA world fertilizer use manual*, París: IFA, 1992. [en línea]. Disponible en: https://www.fertilizer.org/. Consultado: 25 marzo 2019.

[3] A. Valencia, R. Paredes, M. Rosales, E. Godoy, J. Ortega, "Fluid dynamics of submerged gas injection into liquid in a model of copper converter," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 31, núm. 1, pp. 21-30, enero, 2004. [en línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/S0735-1933(03)00198-2. Consultado: 18 febrero 2019.

[4] C. Real, L. Hoyos, F. Cervantes, R. Miranda., M. Palomar-Pardave, M. Barron, J. Gonzales. "Fluid characterization of copper converters," *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. 26, núm. 15, pp. 1311-1323, octubre, 2007. [en línea]. Disponible en: https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/1124/1075. Consultado: 03 marzo, 2019.

[5] D. Chibwe, G. Akdogan, C. Aldrich, R. Eric, "CFD modelling of global mixing parameters in a Peirce-Smith converter with comparison to physical modelling," *Chemical Product and Process Modeling*, vol. 6, núm. 1, pp. 1-27, enero, 2011. [en línea]. Disponible en: https://espace.curtin.edu.au/bitstream/handle/20.500.11937/39656/204637.pdf?sequence=2. Consultado: 19 abril 2019.

[6] T. Fernández, M. Toledo, J. F. Vázquez, "Variación de la intensidad del torbellino con el número de Reynolds", *Científica*, vol.14, núm. 4, pp. 173-178, octubre-dic. 2010.

[7] M. AL-Mashhadani, S. Wilkinson, W. Zimmerman, "Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes," *Chemical Engineering Science*, vol. 137, pp. 243-253, diciembre, 2015. [en línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032. Consultado:25 abril 2019.

[8] A. N. Tijonov, A. A. Samarsky, *Ecuaciones de la física matemática*, Moscú: MIR, 1980. [en línea]. Disponible en: http://samarskii.ru/books/book1984.pdf. Consultado: 19 marzo 2019.

[9] L. D. Landau, E. M. Lisfshitz, *Fluids Mechanics*, 2ª ed., Cambridge: Pergamon Press, 1987. [en línea]. Disponible en: https://www.elsevier.com/books/fluid-mechanics/landau/978-0-08-033933-7. Consultado: 08 mayo 2019.

[10] C. Crowe, M. Sommerfeld and Y. Tsuji, *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, 2ª ed, Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. [en linea]. Disponible en: https://www.crcpress.com/Multiphase-Flows-with-Droplets-and-Particles/Crowe-Schwarzkopf-Sommerfeld-Tsuji/p/book/9781439840504. Consultado: 26 abril 2019

[11] C. R. Torres, B. J. Grau. *Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics*, 1ª ed., Barcelona: Addlink Media, 2007. [en línea]. Disponible en: https://www.addlink.es/productos/introduccion-a-la-mecanica-de-fluidos-y-transferencia-de-calor-con-comsol-multiphysics. Consultado: 25 enero 2019.

[12] R. W. Pryor, *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*, Boston: Jones & Bartlett Learning, 2011. [en línea]. Diponible en: http://teguhhady.lecturer.pens.ac.id/Multiphysics%20modeling%20using%20COMSOL.pdf. Consultado: 28 enero 2019.

AmeliCA

Ameli, Conocimiento Abierto para América Latina y el Sur Global

http://www.amelica.org

Es una iniciativa puesta en marcha por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO), la Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (Redalyc), la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), la Universidad de Antioquia (UdeA) y la Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

Se trata de una nueva configuración de estrategias, en respuesta al contexto internacional, regional, nacional e institucional, que busca una solución de Acceso Abierto colaborativa, sostenible, protegida y no comercial para América Latina y el Sur Global.

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas
de América Latina y el Caribe,
España y Portugal

XML JATS en Redalyc

Redalyc ha emprendido una transición y se suma al estándar XML JATS, bajo la especificación JATS4R, lenguaje de metamarcado con reglas simples, que provee de un método uniforme para describir e intercambiar datos estructurados

xmljatsredalyc.org

REDALYC 3.0

Portal de Portales Latindex

El Portal de Portales Latindex (PPL) proporciona acceso a los contenidos y textos completos de revistas académicas disponibles en hemerotecas digitales de América Latina, el Caribe, España y Portugal, adheridas al movimiento de acceso abierto

más de 1 542 783 artículos indexados

El objetivo de este portal es difundir el conocimiento científico que se publica en la región iberoamericana. El desarrollo informático utiliza el OAI Harvester2 desarrollado por el Public Knowledge Project (PKP) basado en el protocolo OAI-PMH.

www.latindex.ppl.unam.mx

Indicaciones para los autores que deseen publicar en Científica

Científica es una publicación semestral editada Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México a través de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) [ISSN 2594-2921], Unidad Zacatenco, publica tanto artículos de investigación originales e inéditos como notas científicas en español o inglés de la Ingeniería Eléctrica, Mecánica, en Sistemas, Electrónica, en Telecomunicaciones y de la Educación en Ingeniería. *Científica* se suma a la iniciativa del *Committe on Publication Ethics* (COPE, https://publicationethics.org) y se guía por sus principios; además, emplea el software antiplagio Turnitin© al inicio del proceso de dictaminación.

Los manuscritos pueden estar escritos en español o inglés y se reciben en formato electrónico (archivo digital adjunto), por medio del correo electrónico revistacientifipn@yahoo.com.mx con atención al Comité Editorial (Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Edificio 5, 1er Piso, oficina de la revista *Científica*; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, Ciudad de México, México).

Los trabajos recibidos son revisados por el Comité Editorial quienes designan a un Editor Asociado (que desconoce tanto la autoría y procedencia de los manuscritos) de acuerdo a la disciplina que cubren los artículos. El Editor Asociado selecciona dos árbitros externos al IPN para que evalúen el escrito (por pares ciegos). Los trabajos pueden ser aceptados para su publicación, aceptados si se realizan modificaciones necesarias o rechazados. La aceptación está sujeta a la aprobación, en todos los casos, de dos revisores; cuando no hay consenso entre los dos primeros revisores el Editor Asociado resuelve el dictamen. Los trabajos deben ser investigaciones o propuestas originales inéditas, sin excepción, sobre las áreas mencionadas y no pueden estar sujetas a revisión en ninguna otra publicación de forma simultánea; además, el resultado del proceso de arbitraje es inapelable y se sujeta, estrictamente, a las políticas dictadas por el Comité Editorial en funciones. Una vez aceptado un artículo, el autor o autores transfieren los derechos de publicación a la institución editora que está representada por el Editor en Jefe de la revista, los artículos estarán bajo una 'Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional '.

Estructura de los artículos

Los manuscritos deben contener los siguientes elementos: *título*, *datos de los autores*, *resumen* (con palabras clave en español), *abstract* (con palabras clave en inglés: *index terms*), *introducción*, los apartados correspondientes al *desarrollo*, *conclusiones* y *referencias*. Dentro del artículo se numeran, solamente, las secciones desde la introducción hasta las conclusiones.

Título

El título debe ser lo más corto posible (sin utilizar abreviaturas de preferencia) y no exceder de tres líneas.

Datos del autor

Se muestran el o los nombres completos de los autores (sin abreviaturas y distinguiendo los nombres de los apellidos con letras en 'negrita': Nombre **Apellido**), la dirección postal de la institución a la cual pertenecen, país y correo electrónico. En el caso de dos autores o más (de diversas instituciones), se deben mencionar los datos completos de cada uno.

Resumen

Debe contener 250 palabras como máximo. Consiste en una pequeña descripción de la investigación y una breve información de los resultados del trabajo que permite a los lectores identificar con rapidez los aspectos fundamentales del artículo y discernir su relevancia.

Abstract

Se incluye el resumen en inglés.

Palabras clave (Index Terms)

Se deben incluir de tres a cinco descriptores del trabajo en español e inglés.

Declaración de subvenciones

Se debe indicar si el trabajo ha sido realizado con la ayuda de una subvención o fondo especial.

Introducción

Expresa los antecedentes, límites, alcances y relevancia del problema. Plantea las premisas del mismo y el objetivo del trabajo. Se sugiere no extenderla como si fuera una exposición analítica.

Desarrollo

Se refiere al desarrollo del tema que puede ser teórico, experimental, teórico-experimental o la descripción de un nuevo diseño.

Conclusiones

Se establece la respuesta global del problema, son los objetivos alcanzados, las hipótesis comprobadas, modificadas o rechazadas.

Referencias

Es la lista de fuentes bibliográficas: artículos, libros, memorias de congresos, etcétera. Deben aparecer en el orden en el cual se mencionan dentro del artículo, señalándose con el número entre corchetes [1], se muestran a continuación algunos ejemplos con las especificaciones pertinentes (*e*stos siguen las directrices del *IEEE Editorial Style Manual*, y de la norma AENOR UNE-ISO 690):

Artículo de revista científica:

[1] A. Autor, "Nombre del artículo," *Nombre de la revista*, volumen, número, páginas, mes, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[1] R. Ponce-Morales, F. Sánchez-Silva, I. Carvajal-Mariscal, M. Toledo-Velázquez, and J. S. Cruz-Maya, "Estudio experimental de la reducción de fricción en la conducción de fluidos usando surfactantes," *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, vol. 4, no. 6, pp. 205-217, junio, 2014. [en línea]. Disponible en: http://www.redalyc.org/revista.oa?id=768&idp=1. Consultado: 20 octubre, 2014.

Libro:

[2] A. Autor, *Título del libro*, número de edición. Ciudad: Editorial, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[2] J. P. Alperin, D. Babini, and G. E. Fischman, *Indicadores de acceso abierto y comunicaciones académicas en América Latina*, 1ª ed., Buenos Aires: CLACSO, 2014. [en línea]. Disponible en: http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/20141217052547/Indicadores_de_acceso_abierto.pdf. Consultado: 5 febrero, 2015.

Tesis:

[3] A. Autor, "Título de la tesis," grado, departamento, institución, ciudad de la institución, país, año. [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[3] O. I. López-Suárez, "Análisis del desempeño de una prótesis cardíaca en posición aórtica," tesis de maestría, Depto. Ing. Mecánica, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, 2010. [en línea]. Disponible en: http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/10306. Consultado: 17 junio, 2013.

Memorias en congreso:

[4] A. Autor, "Nombre de la ponencia," en *Nombre del Congreso*, ciudad, país, periodo, año [en línea]. Disponible en: URL. Consultado: día mes, año.

Ejemplo:

[4] S. Agrawal, P. Chaporkar, and R. Udwani, "Call admission control for real-time applications in wireless network," en *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, Turín, Italia, 14-19 abril, 2013. [en línea]. Disponible en: doi, 10.1109/INFCOM.2013.6566789. Consultado: 28 noviembre, 2014.

Agradecimientos

Los agradecimientos se consideran dentro del cuerpo del artículo y se incorporan después de las conclusiones.

Anexos

Los anexos (nomenclatura, simbología, notación) se consideran parte del artículo.

Otras consideraciones

El trabajo se entrega en un procesador de textos (*word*) con páginas en tamaño 'carta' con tipo de letra 'Times New Roman' de 10 puntos, interlineado sencillo y espacio entre párrafos sin sangría (párrafo moderno), alineados a la izquierda, se puede solicitar la plantilla para manuscritos al correo electrónico de la revista revistacientifipn@yahoo.com.mx.

Las ecuaciones y fórmulas se enumeran para mayor claridad, deben encontrarse en formato editable, no como imágenes; los acrónimos y abreviaciones deben definirse la primera vez que sean usados en el texto.

Las figuras deben aparecer en el cuerpo del manuscrito y, además, entregarse en archivos por separado (.tif, .jpeg), es importante que al pasar cualquier imagen por un escáner debe hacerlo con una resolución de 300 ppp (puntos por pulgada). Las tablas deben aparecer en el documento en formato editable.

Los pies de las figuras deben estar debajo de estas con la indicación 'Fig. 1'; además, el título de los ejes en figuras a menudo es causa de confusión, por lo que se sugiere usar palabras en lugar de símbolos. Los encabezados de las tablas deben estar arriba de estas. Se requiere el uso, en todo caso, de símbolos (SI) en lugar de abreviaturas.

En el formato de las referencias se han considerados los lineamientos del *IEEE Editorial Style Manual* (2014) del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) y las especificaciones de la norma UNE-ISO 690 (2013) para su adaptación al español, traducida por la Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.

Científica considera que el material utilizado por los autores para su publicación está debidamente autorizado para tal propósito y le corresponde a los autores, no a *Científica*, obtener los permisos correspondientes para dicho material.

La revista *Científica* realizará las modificaciones editoriales pertinentes para el diseño de los manuscritos en el formato vigente.

Information for Authors Submitting Papers to Científica Journal

Científica is a biannual Journal sponsored by Instituto Politécnico Nacional (IPN) Mexico, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) [ISSN 2594-2921], it publishes theoretical and experimental research on Electromechanical and Electronics Engineering, Computer Engineering, Telecommunications, and also Education in Engineering.

Manuscripts could be written in English or Spanish and sent by email to revistacientifipn@yahoo.com.mx addressed to the Editorial Board [Tel. (+52) 55 5729 6000 ext. 54518; Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI), ESIME Zacatenco, Col. Lindavista, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CP 07738, Mexico City, DF, Mexico].

Papers are reviewed by the Editorial Board and sent to an Associate Editor (AE doesn't know authors and their affiliations), he chooses two external referees (blind peer review) selected for their expertise in a given field and reports to the Editorial Board the results. Authors should only submit original work that has neither appeared elsewhere for publication, nor which is under review for another refereed journal. Author accepts sending his/her paper the Editorial Board Policies. Once a manuscript has received the final approval of the reviewers and Editor-in-Chief, the author will be notified and sent a copyright form, in any event, authors must transfer copyright to *Científica*, papers will be shared by a Creative Commons License 'Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)'.

Manuscripts

The manuscript must be prepared in a *word* format with the sections, starting with an abstract, as shown below:

- **Abstract**
- ***Resumen* (Spanish abstract)**
- **Introduction**
- **Body of the manuscript**
- **Conclusions**
- **References**

Title

Must be concise and no longer than 3 lines using capital and lower case letters.

Authors' Name and Affiliations

The authors' name must be written below the title using a one column format staring with the given name followed by one or two family names, if two family names applies, they should be joined by a hyfen (family names must be in **bold** type). Below the authors names must be written the affiliation including the address quality, fax, telephone number and email.

Abstract

The abstract with about 250 words must give a brief description about the research including some comments about the experimental or simulation results and conclusion.

Resumen (Spanish abstract)

It is desirable that, if it is possible, a Spanish abstract be provided.

Index Terms (*palabras clave*)

All papers must contain index terms as provided by the authors. They must be incorporated in Spanish too.

Financial support

All financial support for the work must be listed here and not in the acknowledgment at the end of the paper.

Body of the Manuscript

The body of the manuscript must include an introduction in which the relevance of the research must be explained. A review of related research works by either, the same or another authors must be included. The body of the manuscript also must include the theoretical aspects of the research, as well as experimental or simulation results if any, together with a Conclusions Section.

References

A numbered list of references must be provided at the end of the paper. The list should be arranged in the order of citation in text, not in alphabetical order. List only one reference per reference number. It is not necessary to mention the authors of a reference unless such mention is relevant to the text (see *IEEE Editorial Style Manual*). Sample correct formats for various types of references are as follows.

Periodicals:

[1] F. N. Author, "Name of paper," *Title of Periodical*, vol. x, no. x, pp. xxx-xxx, abbrev. Month, year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[1] L. H. Hernández-Gómez, I. Sauceda-Meza, G. Urriolagoitia-Calderón, A. Balankin, and O. Susarrey, "Evaluation of crack initiation angle under mixed mode loading at diverse strain rates," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, no. 1, pp. 53-61, Sep. 2004. [Online]. Available: http://www.mfractal.esimez.ipn.mx/integrantes/balankin/balankin_publications/public02/2004_3.pdf. Accessed on: May 25 , 2012.

Book:

[2] F. N. Author, *Title of Published Book*, xth ed. City of Publisher: Abbrev. of Publisher, year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[2] L. Jayamaha, *Energy-Efficient Industrial Systems: Evaluation and Implementation* , 1st ed., Portland: McGraw-Hill Education, 2014.

Theses and Dissertations:

[3] F. N. Author, "Title of thesis/dissertation," M. S. thesis or Ph. D. dissertation, Abbrev. Dept., Abbrev. Univ., City of Univ., year. [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[3] L. H. Hernández-Gómez, "Crack Initiation under Shock Loading: Validation of a New Testing Technique," Ph. D. dissertation, Dep. Mech. Ing., Oxford Univ., Oxford, UK, 1992.

Published Conference Proceedings:

[4] F. N. Author, "Title of paper," in *Abbreviated Name of Conf.*, City of Conf., Country, year, pp. xxx-xxx [Online]. Available: URL. Accessed on: Month Day, year.

Example:

[4] S. Agrawal, P. Chaporkar, and R. Udwani, "Call admission control for real-time applications in wireless network," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, Turin, Italy, 14-19 Apr., 2013. [Online]. Available: doi, 10.1109/INFCOM.2013.6566789. Accessed on: Nov. 28, 2014.

Preparation for publication

The following is a list of general guidelines for the submission of electronic media by prospective authors:

The operating system and word processing software used to produce your document should be noted on your e-mail (postscript and Adobe Acrobat PDF files are not acceptable because the files cannot be edited).

Text in 'Times New Roman' at 10, single spacing without paragraph indent;check that your files are complete. Include: abstract, index terms, text, references and figure captions.

Figures comments must be below them and tables comments above. It is necessary to use the International Systems of Units not abbreviations.

In order to achieve the highest quality of reproduction, resolutions of 600 dpi (1 bit/sample) at final printed size for line art (graphs, charts or drawing) and 300 dpi (8 bits/sample) at final printed size for photographs and other grayscale images are required.

Científica assumes that material submitted to its publication is properly available for general dissemination for the readership of this publication. It is the responsibility of the authors, not *Científica*, to determine whether disclosure of their material requires the prior consent of other parties and, if so, to obtain that consent. If an author uses charts, photographs, or other graphics from previously printed material, he/she is responsible for obtaining written permission from the publisher to use the material in his/her manuscript.

Científica does not provide drafting or art services. Thus, the better the quality of the material submitted, the better the published result. Try to adhere to the accepted style as much as possible. Of particular importance here is the references list, editing references guidelines are from the *IEEE Editorial Style Manual* (Chapter V. Editing References, pp.34-40).

Científica
ISSN 2594-2921
Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Unidad Zacatenco, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
México

www.cientifica.esimez.ipn.mx
cientifica@ipn.mx

Instituto Politécnico Nacional, México
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

Científica

ISSN 2594-2921

volumen 14, número 2, julio-diciembre 2020

Comité Editorial

Edison Bonifaz
Universidad San Francisco de Quito (ECUADOR)

Jinhui Shao
University of Shuo (JAPÓN)

Juan Alfonso Beltrán Fernández
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Ku Zilati Ku Shaari
Universiti Teknologi Petronas (MALASIA)

Luis Héctor Hernández Gómez
Instituto Politécnico Nacional (MÉXICO)

Manuel Elices Calafat
Universidad Politécnica de Madrid (ESPAÑA)

María Teresa Alonso Rasgado
University of Manchester (REINO UNIDO)

Marco Ceccarelli
University of Cassino (ITALIA)

Mokhtar Awang
Universiti Teknologi Petronas (MALASIA)

Rômulo Maziero
Universidade Federal de Minas Gerais (BRASIL)

Silvia González Prolongo
Universidad Rey Juan Carlos (ESPAÑA)

Indizada en:

Redalyc: Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal.
www.redalyc.org

Latindex: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.
www.latindex.org

Periódica:
Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.
www.dgbiblio.unam.mx

Contenido

Análisis y modelo para la asignación del despacho y el costo de potencia reactiva de generación de la GCROR
Model to Determine the Dispatch and Cost of Reactive Power Generation of the GCROR in a Released Electricity Market
O. Fernández-Galindo, J. L. Mar-Villegas, J. C. Escamilla-Sánchez
G. Campos-Castillo, I. Albino-Padilla | **México** 83-96

Supresión de una línea de emisión infrarroja a 1550 nm, mediante un sistema de rejilla Bragg de fibra óptica sintonizada por tensión mecánica
Suppression of an Infrared Emission Line at 1550 nm Using a Bragg Fiber Optic Rating System, Tuned by Mechanical Stresst
R. Benítez-Álvarez | **México** 97-101

Modelado para la determinación del poder calorífico de la gasificación de la balsa en instalaciones downdraft mediante redes neuronales artificiales
Determination of the Calorific Power Value of the Balsa Wood through Artificial Neural Networks Modeling in a Downdraft Gasification Facility
E. B. Ibarra-Sánchez, A. L. Oñate-Chiliquinga, A. H. Villavicencio-Poveda | **México** 103-110

Estado del arte, optimización del modelo RLC y retos de fabricación de interconectores para alta frecuencia con base en nanotubos de carbono
State-of-the-art RLC Model Optimization and Fabrication Challenges of High-Frequency Carbon Nanotube-Based Interconnectors
I. Larruz-Castillo, A. Pacheco-Sánchez, D. Valdez-Peréz | **México** 111-123

Evaluación de sistemas eólicos en el Caribe
Evaluation of Wind Systems in the Caribbean
G. Becerra, J. Hernández, E. Osorio, J. O. Aguilar, J. Vazquez | **México** 125-133

Medición de la eficiencia y temperaturas en un transformador tipo seco que alimenta a un rectificador trifásico no controlado
Measurement of efficiency and temperatures in a dry type transformer that feeds a three-phase uncontrolled rectifier
J. A. Álvarez-Salas, J. Segundo-Ramírez, V. M. Cárdenas-Galindo, R. Álvarez-Salas | **México** 135-142

Modelado de orden fraccional de la dinámica de robots manipuladores de 1, 2 y 3 GDL
Fractional Order Model of the dynamic of manipulate-robots of 1,2 & 3 DOF
I. Cerón-Morales | **México** 143-152

Obtención y caracterización de capas de elevada dureza sobre fundiciones nodulares, mediante técnicas de difusión termorreactiva
Obtaining and characterization of high hardness layers on Ductile Irons by means of Thermoreactive Diffusion techniques
D. G. Agredo-Diaz, A, Barba-Pingarrón, D. Sánchez-Ruiz, J. R. González-Parra, R. G. Valdez-Navarro
J. J. Olaya-Florez, C. A. González-Rodriguez, I. Angarita-Moncaleano | **México** 153-159

Resistencia a la compresión de la laja tipo salmón procedente de San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, México
Compressive strength of the slate type Salmón from San José de Gracia, Molcaxac, Puebla, Mexico
A. M. Morales-Tassinari, E. Gómez-Alonso, M. Zárate-Reyes | **México** 161-170

Solución numérica del flujo transitorio en tanques cilíndricos horizontales producido por la inyección de aire con tres toberas
Numerical Solution of the Transient Flow in Horizontal Cylindrical Tanks Produced by the Injection of Air with Three Nozzles
A. Lizardi-Ramos, H. Terres-Peña, R. López-Callejas, M. Vaca-Mier, S. Chávez-Sánchez | **México** 171-178

Equipo Editorial
Guillermo Urriolagoitia Calderón, **Editor en Jefe** · Christopher René Torres San Miguel, **Coeditor**
Alma Vicenta Miranda Godínez, **Coordinadora Editorial** · Cuauhtémoc Jiménez Pérez, **Editor Técnico**